

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh horkovodního fluidního kotle o výkonu 15 MW<sub>t</sub>

Proposal Hot Water Fluidized Bed Boiler Power of 15 MW<sub>t</sub>

Student:

Bc. Martin Bělík

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

Ostrava 2017

# Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Bělík**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení

Téma: **Návrh horkovodního fluidního kotle o výkonu 15 MWt**  
**Proposal Hot Water Fluidized Bed Boiler Power of 15 MWt**

Jazyk vypracování: čeština

## Zásady pro vypracování:

Vypracujte návrh fluidního horkovodního kotle o výkonu 15 MWt spalujícího hnědé uhlí.

Diplomová práce bude obsahovat:

1. Rešerši fluidních kotlů a návrh vybrané koncepce kotle.
2. Výběr paliva a základní bilanční výpočty paliva, vzduchu a spalín.
3. Návrh hlavních rozměrů kotle.
4. Tepelný výpočet jednotlivých ploch tlakového celku.
5. Konstrukční návrh kotle s naznačením příslušenství.

Grafické práce:

1. Schéma zařízení.
2. Výkresová dokumentace sestavy kotle.

## Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Černý V. a kol. Parní kotle a spalovací zařízení, SNTL Praha 1975.
- [2] Kolat P. Přenos tepla a hmoty, skripta VŠB Ostrava 1987.
- [3] ON 074017 Tepelný výpočet parních kotlů.
- [4] Dlouhý T. Výpočty kotlů a spalínových výměníků, skripta ČVUT Praha 2005.
- [5] Podklady a materiály katedry energetiky z měření na fluidních kotlech.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Bohumír Čech**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017

---

doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.  
*vedoucí katedry*

---

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
*děkan fakulty*

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Adresa trvalého pobytu autora práce:

## ABSTRAKT

BĚLÍK, M. Návrh horkovodního fluidního kotle o výkonu 15 MW<sub>t</sub> : diplomová práce. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2017, 49 s. Vedoucí práce Čech, B..

Práce se zabývá návrhem horkovodního fluidního kotle, spalující hnědé uhlí. V úvodu práce se věnuji typům fluidních kotlů. Práce v druhé části reflektuje bilanční výpočty paliva, vzduchu a spalín, návrh kotle a jeho příslušenství, výpočet teplosměnných ploch. V závěru se věnuji schématu fluidního kotle a výkresové dokumentaci.

## ABSTRACT

BĚLÍK, M. Proposal Hot Water Fluidized Bed Boiler Power of 15 MW<sub>t</sub> : thesis. Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energetic, 2017, 49 p. Thesis head: Čech, B.

The thesis deals with the design of a hot-water fluid bed boiler burning brown coal. At the beginning of the thesis I deal with the types of fluid boilers. The work in the second part reflects the balance calculations of fuel, air and flue gas, design of the boiler and its accessories, calculation of the heat exchange surfaces. In conclusion I deal with the fluid bed boiler scheme and the drawing documentation.

## Obsah

1	Úvod .....	7
2	Úvod do spalování .....	8
2.1	Fluidní spalování .....	9
2.2	Výhody a nevýhody fluidního spalování .....	9
2.3	Vznik a základní vlastnosti fluidní vrstvy .....	10
2.4	Koncepce zařízení s fluidním spalováním .....	11
3	Stechiometrie .....	13
3.1	Množství vzduchu .....	14
3.2	Objemy jednotlivých složek ve spalínách .....	14
3.3	Minimální objem spalin .....	15
3.4	Skutečné množství spalin při spalování s přebytkem .....	15
3.5	Entalpie vzduchu a spalin .....	16
4	Návrh hlavních rozměrů kotle .....	19
4.1	výpočet množství paliva .....	19
4.2	Množství cirkulující vody v kotli .....	19
4.3	Výpočet plochy roštu .....	19
4.4	Návrh cyklonového odlučovače .....	21
5	Tepelný výpočet jednotlivých ploch .....	24
5.1	Výpočet ohříváku vzduchu .....	24
5.2	Ohřívák vody I .....	29
5.3	Ohřívák vody II .....	34
5.4	Membránové stěny ve spalovací komoře .....	39
5.5	Návrh membránového ohříváku v II. tahu .....	40
6	Celkový výkon kotle .....	44
7	Konstrukční návrh kotle .....	44
8	Závěr .....	45
	Citace .....	46
	Seznam použitých zkratk .....	47
	Seznam obrázků, tabulek a příloh .....	49

## 1 Úvod

Diplomová práce se zabývá seznámením se s problematikou spalování hnědého uhlí ve fluidním kotli a návrhu horkovodního fluidního kotle. Kotel je řešen jako fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou. Fluidní kotel má výkon  $15 \text{ MW}_t$  při teplotním spádu vody  $70^\circ\text{C}/130^\circ\text{C}$ . Při návrhu je požadavek na co nejlepší účinnost kotle a dlouhodobou výdrž teplosměnných ploch. Uhlí je spalováno ve spalovací komoře ve fluidní vrstvě. Spaliny jsou dále využívány pro ohřev vody v teplosměnných plochách ohříváku vody. U horkovodního kotle jsou použité ohříváky vody tvořené hady z trubek, membránovými stěnami a ohřívákem vzduchu. Při průchodu spalin přes všechny teplosměnné plochy dojde k jejich ochlazení na co nejmenší teplotu z důvodu zmenšení tepelné ztráty citelným teplem. Dále práce obsahuje stechiometrické výpočty, diagram průběhu teplot pracovního média a spalin. K práci je připojen konstrukční návrh horkovodního fluidního kotle, výkresy ohříváku vzduchu a výkresy ohříváků vody.

## 2 Úvod do spalování

Výroba tepelné a elektrické energie je v České republice nejběžněji založena na přeměně chemické energie hnědého uhlí a černého uhlí. Určitou část elektrické energie tvoří výroba v jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín, přesto zůstává velké množství energie, která je vyráběná v teplárnách a tepelných elektrárnách.

Pro české hospodářství je charakteristické, že hlavním zdrojem paliv na výrobu tepelné energie a elektrické energie jsou fosilní paliva, nejběžněji pak uhlí. Uhlí je nejvýznamnějším z fosilních paliv užívaných k výrobě tepelné a elektrické energie. Spalování je složitým procesem, jehož výsledky záleží jak na chemickém složení, např. prouhelnění, podíl balastních látek, tak i na podmínkách při jeho spalování. Světové zásoby uhlí jsou odhadovány na více jak 200 let, při současné úrovni těžby.

Spalování uhlí probíhá při heterogenní reakci, jenž probíhá na povrchu uhelných zrn a dalších dílčích krocích. Reakce vždy přechází do difuzního typu hoření. Kyslík, složka spalovacího vzduchu je vnášen do ohniště různými způsoby, které určují jeho proudění v ohništi. Podle rychlosti proudění vzduchu v ohništi je provedeno rozdělení uhelných ohnišť. U roštového ohniště leží vrstva uhlí nehybně na roštu a vzduch proudí mezizrnným prostorem mezi částicemi uhlí ležících na roštu, mimo vrstvu uhlí proudí mimovrstvovou rychlostí vzduch, jenž s rostoucí rychlostí roste, a s tím roste i rychlost hoření a tlaková ztráta ve vrstvě. Roštová ohniště se v České republice používají jako typ pro menší výkony. Pro další provoz těchto ohnišť je nutná jejich modernizace a používání tříděného paliva.

Dalším typem ohniště je fluidní, které je děleno na ohniště se stacionární fluidní vrstvou a cirkulující fluidní vrstvou. Znakem spalování ve fluidní vrstvě je to, že spalované palivo je nadnášeno proudem vzduchu tak, že se chová jako kapalina, a vyhořelé částice jako popel, jenž mají malou hmotnost a jsou u hladiny vynášeny, zatím co uhlí je do ohniště dodáváno pod hladinou. U stacionárního spalování nesmí být dosaženo teploty měknutí popeloviny, která by měla za následek slepování částic. Při spalování v cirkulující fluidní vrstvě se ve spalované vrstvě nachází palivo, popel a vápenec, který snižuje emise  $\text{SO}_2$  a relativně nízká teplota fluidní vrstvy snižuje emise  $\text{NO}_x$ .

Posledním typem jsou prášková ohniště. Vznikla po roštových a zpočátku sloužila pro spalování prachové frakce vzniklé při třídění paliva, kterou nebylo v té době možné efektivně spalovat na rostech. Spalování paliva probíhá v letu, tzn., že palivo musí být pomleté a usušené a tento proces je nákladnější než v případě roštového ohniště. Kromě toho vzniká z uhelného prášku jemnější popel, který je unášen spalinami, a zanáší výhřevné plochy, popřípadě se dostane komínem ven a znečišťuje biosféru.



Proto je třeba práškové kotle vybavit odlučovači popele. Nevýhodou je velké množství vzniklého zachyceného popele, který je nutné někam dopravit, nebo skladovat. [1; 2]

## 2.1 Fluidní spalování

Jednou z možností, jak celkově vyřešit problematiku emisí  $\text{SO}_2$  a  $\text{NO}_x$  je v podstatě fluidní spalování. V důsledku zpřísnování emisních limitů bylo v devadesátých letech vybudováno 27 velkých fluidních zařízení s průměrným výkonem  $194 \text{ t.h}^{-1}$  páry. Většina fluidních kotlů je různého výkonu a koncepce, a to i v případě jedné kotelny, kde se kotle používají. [2]

## 2.2 Výhody a nevýhody fluidního spalování

### *Výhody fluidního spalování:*

- možnost spalování různých druhů paliv, černého a hnědého uhlí, popřípadě jejich směs nebo biopaliva, případně odpady
- vysoká účinnost při spalování, kdy při volbě vhodné technologie lze dosáhnout obsahu nespálených látek v tuhých zbytcích pod 1 %
- nízká spalovací teplota ( $850 \div 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ) má dobrý vliv na tvorbu emisí  $\text{NO}$  a  $\text{NO}_2$ , které se pohybují pod  $200 \text{ mg.m}^{-3}_{\text{N}}$ , při 6 %  $\text{O}_2$
- minimální hodnoty dosahují emise chloru  $\text{Cl}$  a fluoru  $\text{F}$ , které se vážou na popelovinu a vápník
- velký rozsah regulace výkonů ( $30 \div 110 \text{ } \%$ ), který je velkou výhodou pro teplárenské zdroje
- kotle můžeme odstavit do teplé zálohy na delší dobu, s možností rychlého najetí na 100% výkon, bez potřeby použití přídavných paliv (plyn, kapalná paliva) pro najetí

### *Nevýhody fluidního spalování:*

- složitá technologie, jelikož prvky kotle pracují ve vysoce abrazivním prostředí při vysokých teplotách  $800 \div 900 \text{ }^\circ\text{C}$
- velká spotřeba měrné elektrické energie na jednotku elektrického výkonu v důsledku velké spotřeby stlačeného a fluidizačního vzduchu, která je vyšší než u klasických kotlů
- složitější údržba a delší doba najetí ze studeného stavu
- složitá likvidace popílku s velkým obsahem sloučenin vápníku

## 2.3 Vznik a základní vlastnosti fluidní vrstvy

Využití fluidní vrstvy pro technické účely je velmi staré. Prvotní využití fluidní techniky se datuje ve středověku, kde se využívala pro třídění rozdrcených zlatých rud s následnou amalgamací. V 19. století se využití rozšířilo do chemických reaktorů, a v polovině 20. století se rozšířila i do oblasti energetiky. Rozšíření do energetických spalovacích zařízení trvalo poměrně dlouhou dobu, jelikož nastaly technické problémy. Problémy se týkaly regulace fluidní vrstvy na teplotu  $800 \div 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , aby nedocházelo ke spékání vrstvy, musela být zajištěna kontinuální doprava paliva do fluidní vrstvy a řešeny velké energetické nároky ventilátoru pro fluidní vrstvu. [2]

Pro vznik fluidní vrstvy je zapotřebí průtok fluidizačního média (např. vzduchu) vrstvou tuhých částic, jejich vzájemné působení je jednou z podmínek pro izotermickou spalovací reakci. Tuhé částice se mohou nacházet v několika stavech:

- v klidu, tuhé částice tvoří nehybnou vrstvu, hovoříme o spalování na roštu,
- v kmitavém pohybu, tuhé částice se nachází na prahu fluidizace,
- ve vířivém kmitavém pohybu, tuhé částice se nacházejí ve fluidní vrstvě, kde podle intenzity průtoku fluidizačního média hovoříme o několika typech fluidní vrstvy.

Hydraulický odpor, který je kladen vrstvou vertikálnímu průtoku vzdušiny a roste od počáteční hodnoty lineárně s rostoucím průtokem až do hodnoty, kdy jsou jednotlivé částice fluidní vrstvy nehybné. Při dalším zvýšení průtoku vzdušiny jsou síly protékající vzdušiny, působící na částice fluidní vrstvy, v rovnováze s gravitačními silami. Částice začínají kmitat a celá směs má vlastnosti pseudokapaliny. Směs působí na stěny hydrostatickým tlakem, přetéká do připojených nádob, odděluje lehčí a těžší a zároveň větší a menší částice. Příslušná rychlost fluidizační vzdušiny je prahovou rychlostí fluidizace. Vrstva má při menším průtoku fluidizačního vzduchu homogenní koncentraci s jasně definovanou hladinou. Další zvyšování průtoku fluidizační vzdušiny působí expanzi vrstvy při nepatrně zvýšeném odporu. Zároveň dochází k intenzivnímu míchání částic fluidní vrstvy. Jemné částice jsou z fluidní vrstvy vynášeny na povrch, naopak hrubší částice se shromažďují u dna fluidní vrstvy. Vrstva je nehomogenní s velkým množstvím bublin fluidizačního média. [2]

## 2.4 Koncepce zařízení s fluidním spalováním

Řešení konstrukce fluidních kotlů na tuhá paliva lze rozdělit na následující typy :

- a) kotle se stacionární fluidní vrstvou a vrácením únosu pevných částic
- b) kotle s expandující fluidní vrstvou, kde fluidní vrstva cirkuluje mezi fluidní vrstvou a koncem ohniště. Taky se mohou nazývat jako kotle s vnitřní cirkulací.
- c) kotle s cirkulující fluidní vrstvou, kde částice fluidní vrstvy spolu s částicemi paliva jsou odlučovány za výstupem spalin z ohniště většinou pomocí cyklonu a jsou vráceny zpět do fluidní vrstvy.

### a) Kotle se stacionární fluidní vrstvou

Kotle se stacionární fluidní vrstvou mohou být dvojího typu. První možností je, že stacionární vrstvu tvoří 95% až 98% neaktivní částice a zbytek tvoří palivo. Spalování probíhá při přebytku vzduchu  $\alpha > 1$ . Teplota fluidní vrstvy je regulována mezi teplotami  $850 \div 900$  °C tak, aby nedošlo k natavení povrchu inertních částic. Regulace teploty se provádí pomocí chladiče fluidní vrstvy ponořeným ve fluidní vrstvě odvodem tepla. Tuhé částice, které se odloučí na výstupu, se vracejí zpět do spalovací komory.

Druhou možností je fluidní vrstva tvořena 80% neaktivních částic a 20% částicemi paliva s rozdílným stupněm vyhoření uhlíku. Spalovací proces probíhá při přebytku vzduchu  $\alpha < 1$ . Podstechiometrické množství fluidního vzduchu je zároveň základem pro regulaci spalovací teploty. Spaliny vzniklé ve fluidní vrstvě jsou vedeny do II. stupně, kde probíhá dohořívání plynného CO a jemných částic paliva. Zde je opět snahou řešit snížení obsahu spalitelných látek v úletu vrácením únosu zpět do ohniště kotle.

Zvláštním typem tohoto spalování je jednostupňové fluidní ohniště se škvárující fluidní vrstvou. Fluidní vrstva je v tomto případě tvořena převážně částicemi paliva o velikosti zrna do 20 mm. Částice paliva se při vstupu odplyní a hoří při teplotě  $1200 \div 1300$  °C. Regulace intenzity spalování se provádí přebytkem primárního vzduchu. Pro dohoření plynných složek paliva nad fluidní vrstvou a dohoření jemných částic se používá sekundární vzduch. Fluidní rošt je pásový, ve směru pohybu se šikmo zvedá a vynáší z fluidní vrstvy spečené částice popelovin. [2]

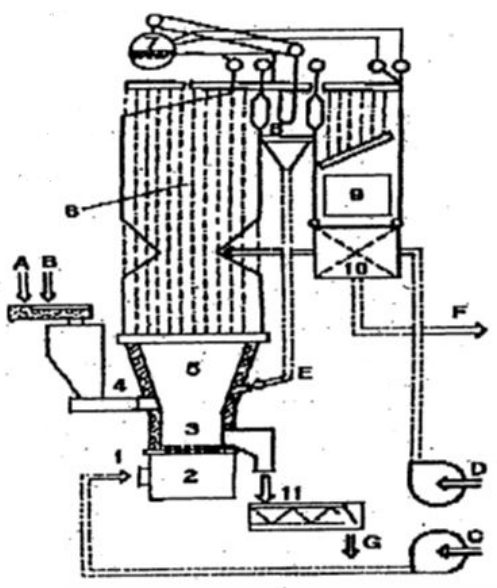
Charakteristické nedostatky pro výše uvedené typy kotlů, které brání masovému rozšíření a stavbě jednotek větších výkonů.

- velký úlet jemných částic (paliva nebo inertu) z fluidní vrstvy a jeho další vrácení do fluidní vrstvy, případně jeho zpracování, vyšší ztráty mechanickým nedopalem

- vysoké plynné emise CO z důvodů vysokého obsahu nespáleného uhlíku v popílku
- složité a nespolehlivé technické řešení regulace teploty fluidní vrstvy a výkonu kotle

### **b) Kotle s expandující fluidní vrstvou**

Tento typ kotle je se zplyňovacím reaktorem umístěným ve spodní části ohniště. Tuhé částice cirkulují mezi spodním zplyňovacím reaktorem a rozšířenou spalovací komorou. Cílem této koncepce je částečné odstranění nedostatků uvedených u kotlů se stacionární fluidní vrstvou. Jednoznačně však ani tento typ kotle neodstraní všechny nevýhody uvedené u kotle se stacionární fluidní vrstvou. Obrázek kotle s expandující fluidní vrstvou viz Obr. 2.1. [2]



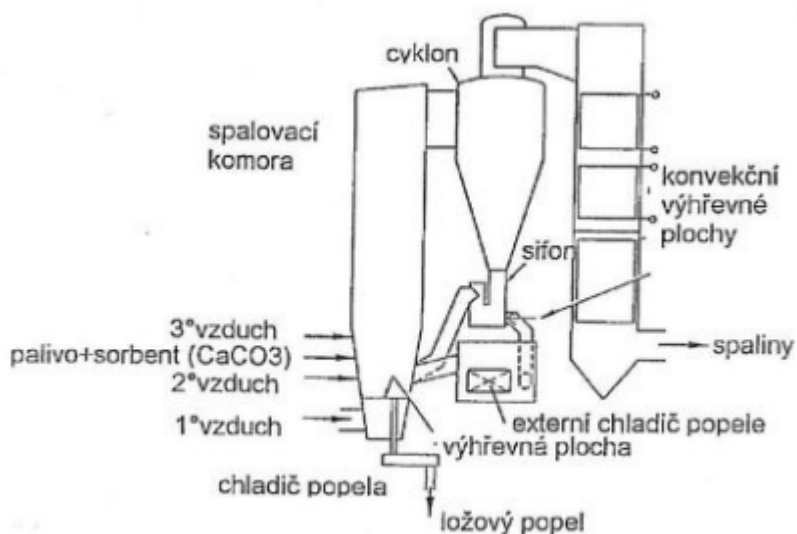
- 1 – fluidní rošt, 2 – vzduchová komora, 3 – fluidní vrstva, 4 – podavač paliva,  
 5 – fluidní reaktor, 6 – spalovací komora, 7 – bubnový kotel, 8 – přehřívák páry,  
 9 – ohřívák vody, 10 – ohřívák vzduchu, 11 – chlazení a doprava popílku,  
 A, B – palivo a aditivum, C – ventilátor s primárním vzduchem, D – ventilátor  
 se sekundárním vzduchem, E – recirkulace popílku, F – výstup spalin, G – odvod popílku

Obr. 2.1. Fluidní kotel se stacionární fluidní vrstvou [4]

### **c) Kotle s cirkulující fluidní vrstvou**

Uvedené nedostatky kotlů se stacionární fluidní vrstvou byly vyřešeny odlišným řešením koncepce fluidního ohniště. Hlavní nedostatek stacionární fluidní vrstvy - únos jemných částic paliva a inertu byl řešen jako přednost kotlů s cirkulující fluidní vrstvou. Podíl nespálených částic paliva byl u kotlů s cirkulující fluidní vrstvou odstraněn zvětšením výšky spalovací komory kotlů a cirkulací fluidní vrstvy mezi ohništěm a

mechanickým odlučovačem. Několikanásobná cirkulace fluidní vrstvy je samozřejmě energeticky náročnější. Fluidní vrstva u těchto kotlů je velmi zředěná. Schéma fluidního kotle s cirkulující fluidní vrstvou Obr.2.2. [2]



Obr.2.2. Fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou [6]

### 3 Stechiometrie

Jako palivo pro fluidní kotel bude použito hnědé uhlí z dolu Bílina. Pomocí stechiometrických výpočtu, které vycházejí z prvkového rozboru, jenž je uveden v katalogu, získáme objem vzduchu pro spálení jednotkového množství paliva a množství spalin, které vzniknou při spalování paliva. Je použito stechiometrických rovnic a bilance látkového množství, výpočty jsou řešeny objemově. Při výpočtu vzduchu předpokládáme relativní vlhkost 70% a venkovní teplotu 20°C.

Palivo: Hnědé uhlí - důl Bílina ,druh paliva : hruboprach ,Výhřevnost  $Q_i=16,9$  MJ/kg

Tab 3.1 Prvkový rozbor paliva

Prvky spalin	Hodnota	Jednotka
$W^r$	30,20	%
$A^r$	9,14	%
$C^r$	42,93	%
$H^r$	3,40	%
$N^r$	0,53	%
$O^r$	13,73	%
$S^r$	0,84	%

W - vlhkost paliva C; H; N; O; S - hořlavé prvky

### 3.1 Množství vzduchu

- Minimální množství kyslíku které je nutno přivést pro spálení 1kg paliva

$$O_{O_2 \min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left( \frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad (3.1.1.)$$

$$O_{O_2 \min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left( \frac{42,93}{12,01} + \frac{3,40}{4,032} + \frac{0,84}{32,06} - \frac{13,73}{32} \right)$$

$$O_{O_2 \min} = 0,9010 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

- Minimální množství suchého vzduchu pro spálení 1kg paliva

$$O_{vz \min}^s = \frac{O_{O_2 \min}}{0,21} \quad (3.1.2.)$$

$$O_{vz \min}^s = \frac{0,9010}{0,21}$$

$$O_{vz \min}^s = 4,2906 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

- Minimální množství vlhkého vzduchu na spálení 1kg vzduchu

f-podíl vodní páry na 1Nm<sup>3</sup> suchého vzduchu, pro relativní vlhkost 70% a teplotu 20°C je  $\varphi=1,016$

$$O_{vz \min}^v = \varphi \cdot O_{vz \min}^s = 1,016 \cdot 4,2906 = 4,3627 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (3.1.3.)$$

- Objem vodní páry ve spalovacím vzduchu pro spálení 1kg paliva

$$O_{H_2O \min} = O_{vz \min}^v - O_{vz \min}^s = 4,3627 - 4,2906 = 0,0721 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (3.1.4.)$$

### 3.2 Objemy jednotlivých složek ve spalínách

- Objem oxidu uhličitého

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{C^r}{12,01} + 0,0003 \cdot O_{vz \min}^s \quad (3.2.1.)$$

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{42,93}{12,01} + 0,0003 \cdot 4,2906 = 0,7964 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

- Objem oxidu siřičitého

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S^r}{32,06} \quad (3.2.2.)$$

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{0,84}{32,06} = 0,0057 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

- Objem dusíku

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{N^r}{28,016} + 0,78 \cdot O_{vz \min}^s \quad (3.2.3.)$$

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{0,53}{28,016} + 0,78 \cdot 4,2906 = 3,3509 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

### 3.3 Minimální objem spalin

- Minimální objem suchých spalin

$$O_{SP \min}^s = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} \quad (3.3.1.)$$

$$O_{SP \min}^s = 0,7964 + 0,0057 + 3,3509 = 4,1530 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

- Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin

$$O_{sp}^{H_2O \min} = \frac{44,8 \cdot H^r}{100 \cdot 4,032} + \frac{22,4 \cdot W^r}{18,016 \cdot 100} + O_{H_2O \min} \quad (3.3.2.)$$

$$O_{sp}^{H_2O \min} = \frac{44,8 \cdot 3,4}{100 \cdot 4,032} + \frac{22,4 \cdot 30,2}{18,016 \cdot 100} + 0,0721 = 0,8254 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

- Minimální objem vlhkých spalin

$$O_{SP \min}^V = O_{SP \min}^s + O_{sp}^{H_2O \min} = 4,1530 + 0,8254 = 4,9764 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (3.3.4.)$$

### 3.4 Skutečné množství spalin při spalování s přebytkem

V reálných podmínkách nedochází k dokonalému spalování při stechiometrickém množství vzduchu. Proto po konzultaci byl zvolen součinitele přebytku vzduchu  $\alpha=1,1$ .

- Skutečné množství suchého vzduchu

$$O_{vz skut}^s = \alpha \cdot O_{vz \min}^s = 1,1 \cdot 4,2906 = 4,7196 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (3.4.1.)$$

- Skutečné množství vlhkého vzduchu

$$O_{vz\ skut}^v = f \cdot O_{vz\ skut}^s = 1,0168 \cdot 4,7196 = 4,7989 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (3.4.2.)$$

- Skutečné množství suchých spalin

$$O_{SP\ skut}^s = O_{sp\ min}^s + (\alpha - 1) \cdot O_{vz\ min}^s = 4,1530 + (1,1 - 1) \cdot 4,2906 \quad (3.4.3.)$$

$$O_{SP\ skut}^s = 4,5821 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

- skutečné množství vlhkých spalin

$$O_{SP\ skut}^v = O_{sp\ min}^v + (\alpha - 1) \cdot O_{vz\ min}^v = 4,9764 + (1,1 - 1) \cdot 4,3627 \quad (3.4.4.)$$

$$O_{SP\ skut}^v = 5,4127 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

### 3.5 Entalpie vzduchu a spalin

Při tepelné bilanci je třeba vyjádřit teplo, které spalinám odebereme. Pro tento účel je vhodné využívat entalpii spalin, která se mění s teplotou méně než jejich měrná teplotná kapacita. Jednotkou entalpie spalin je  $\text{kJ/kg}_{\text{paliva}}$ .

Spaliny lze vyjádřit jako směs plynů, které obsahují rozptýlené části popílku a jejich výslednou entalpii lze vyjádřit součtem dílčích složek včetně popílku. V tabulce 3.2 jsou měrné entalpie některých složek v závislosti na teplotě.

Tab. 3.2 Měrná entalpie vybraných složek [3]

t (°C)	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Ar	H <sub>2</sub> O	Suchý	CO	O <sub>2</sub>	popílek
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	41,62	46,81	32,53	23,32	39,1	32,57	32,49	32,78	20,2
100	170	191,2	129,5	93,07	150,6	132,3	132,3	131,7	80,4
200	357,5	394,1	259,9	186	304,5	266,2	261,4	267	170
300	558,8	610,4	392,1	278,8	462,8	402,5	395	406,8	264,6
400	71,9	836,5	526,7	371,7	625,9	541,7	531,7	550,9	361,6
500	994,4	1070	664	464,7	794,5	684,1	671,6	698,7	459,5
600	1225	1310	804,3	557,3	968,8	829,6	814,3	849,9	558
700	1462	1554	947,3	650,2	1149	978,1	960,4	1003	658,3
800	1705	1801	1093	743,1	1335	1129	1109	1159	760,8
900	1952	202	1241	853,7	1526	1283	1260	1318	868,4
1000	2203	2304	1392	928,2	1723	1439	1413	1477	982,8



- Entalpie stechiometrických spalín

pro přebytek  $\alpha=1$  a teplotu  $25^\circ\text{C}$

$$I_{S\min}^t = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^t + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^t + O_{N_2} \cdot i_{N_2}^t + O_{Ar} \cdot i_{Ar}^t + O_{sp}^{H_2O\min} \cdot i_{H_2O}^t \quad (3.5.1.)$$

$$I_{S\min}^t = 0,7964 \cdot 41,62 + 0,0057 \cdot 46,81 + 3,3509 \cdot 32,53 + 9,14 \cdot 23,32 + 0,8254 \cdot 39,1$$

$$I_{S\min}^t = 387,924 \text{ kJ/kg}$$

- Entalpie minimálního množství vzduchu

$$I_{V\min}^t = O_{VS\min} \cdot i_{VS}^t + O_{sp}^{H_2O\min} \cdot i_{H_2O}^t \quad (3.5.2.)$$

$$I_{V\min}^t = 4,2906 \cdot 32,57 + 0,8254 \cdot 39,1$$

$$I_{V\min}^t = 172,016 \text{ kJ/kg}$$

- Entalpie spalín při spalování s přebytkem

příklad výpočtu pro teplotu  $100^\circ\text{C}$  a přebytek vzduchu  $\alpha=1,3$

$$I_s^{t,\alpha} = I_{S\min}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{V\min}^t \quad (3.5.3.)$$

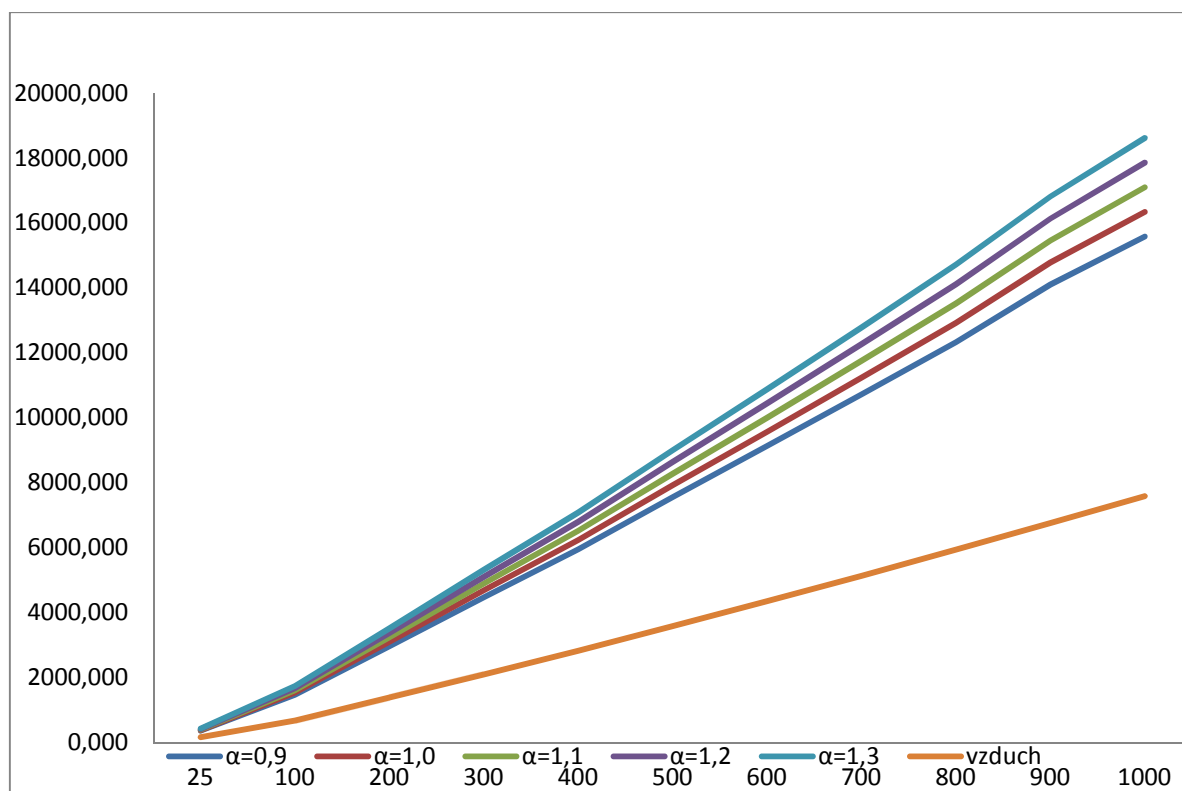
$$I_s^{t,\alpha} = 387,924 + (1,3 - 1) \cdot 172,016$$

$$I_s^{t,\alpha} = 439,529 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Vypočtené hodnoty entalpií pro další teploty a přebytky vzduchu jsou uvedeny v následující tabulce 3.3. Podle hodnot byl sestaven I-t diagram vzduchu a spalín viz Obr. 3.1.

Tab. 3.3 I-t tabulka spalín

t(°C)	$I_{S\ min}^t$ (kJ/kg)	$I_{V\ min}^t$ (kJ/kg)					
			$\alpha=0,9$	$\alpha=1$	$\alpha=1,1$	$\alpha=1,2$	$\alpha=1,3$
0	0	0	0	0	0	0	0
25	387,924	172,016	370,723	387,924	405,126	422,328	439,529
100	1545,738	691,945	1476,544	1545,738	1614,933	1684,127	1753,322
200	3109,939	1393,479	2970,591	3109,939	3249,287	3388,635	3527,983
300	4693,682	2108,942	4482,788	4693,682	4904,576	5115,470	5326,365
400	5742,317	2840,810	5958,236	6242,317	6526,398	6810,478	7094,559
500	7927,941	3590,947	7568,846	7927,941	8287,036	8646,130	9005,225
600	9573,673	4359,089	9137,764	9573,673	10009,582	10445,491	10881,400
700	11241,186	5144,973	10726,688	11241,186	11755,683	12270,180	12784,677
800	12927,328	5945,942	12332,734	12927,328	13521,922	14116,517	14711,111
900	14779,814	6764,338	14103,380	14779,814	15456,247	16132,681	16809,115
1000	16341,494	7596,268	15581,867	16341,494	17101,121	17860,748	18620,375



Obr. 3.1 I-t diagram spalín

## 4 Návrh hlavních rozměrů kotle

### 4.1 výpočet množství paliva

výkon kotle  $Q_v = 15 \text{ MW}_t$

výhřevnost paliva  $Q_i = 16,9 \text{ MJ/kg}$

účinnost kotle, po konzultaci byl zvolen  $\eta = 90 \%$

$$M_p = \frac{Q_v}{Q_i \cdot \eta} \quad (4.1.1.)$$

$$M_p = \frac{15}{16,9 \cdot 0,9}$$

$$M_p = 0,843 \text{ kg/s}$$

### 4.2 Množství cirkulující vody v kotli

teplota napájecí vody je  $70^\circ\text{C}$ ,  $i_{nv} = 292,99$

teplota ohřáté vody je  $130^\circ\text{C}$ ,  $i_{ov} = 546,38$

$$M_{vody} = \frac{Q_v}{i_{ov} - i_{nv}} \quad (4.2.1.)$$

$$M_{vody} = \frac{15000 \text{ kW}}{545,48 - 293,72}$$

$$M_{vody} = 59,5806 \text{ dm}^3/\text{s}$$

### 4.3 Výpočet plochy roštu

Při výpočtu velikosti plochy roštu se vychází z parametrů fluidního kotle NK14, který je využíván v třineckých železárnách. Přepočtem se dospělo k plošnému zatížení

$$q_s = 9,89 \text{ MW/m}^2$$

$$S_{rošt} = \frac{M_p \cdot Q_i}{q_s} \quad (4.3.1.)$$

$$S_{rošt} = \frac{0,843 \cdot 16,9}{9,89}$$

$$S_{rošt} = 1,44 \text{ m}^2$$

Na základě těchto výpočtů byly zvoleny rozměry roštu: délka  $a=1800\text{mm}$  a šířka  $b=800\text{mm}$ .

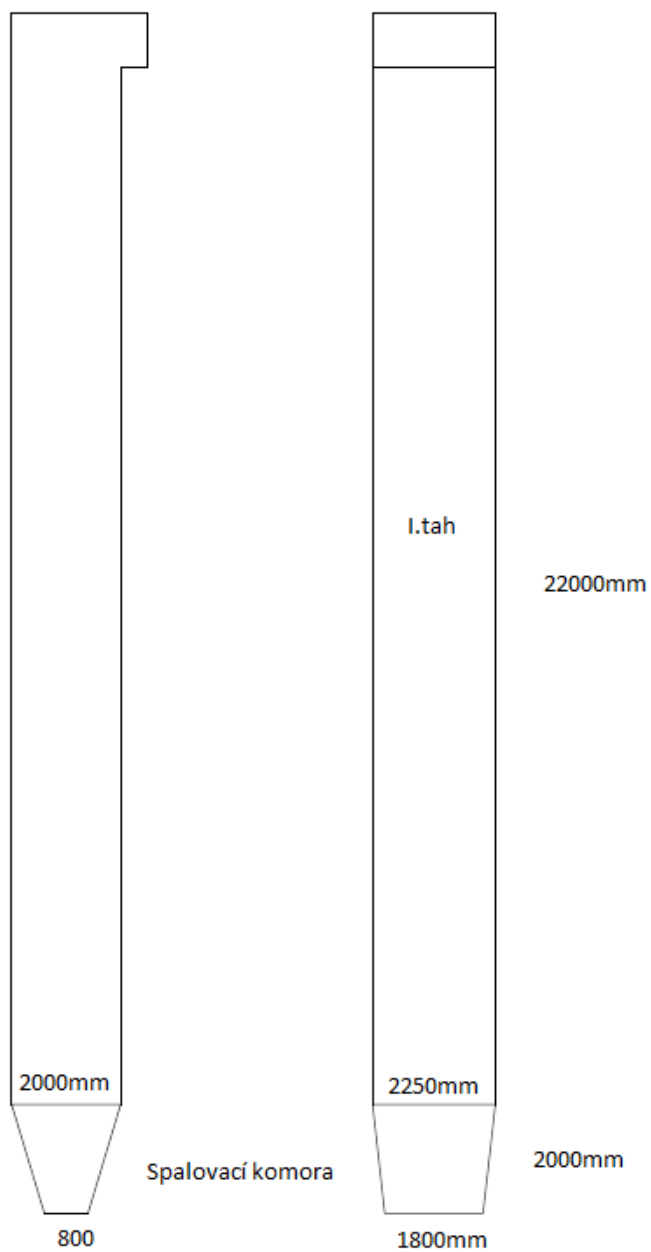
$$\text{kontrola plochy : } S = a \cdot b = 1,8 \cdot 0,8 = 1,44 \text{ m}^2 \quad (4.3.2.)$$

- výška betonové vyzdívky v ohništi bude 2m
- rozměry spalovací komory byly voleny viz Obr.4.3.1 Návrh spalovací komory

$a=2250$  mm

$b=2000$  mm

$v=22000$  mm



Obr.4.3.1 Návrh spalovací komory

Teplota ve spalovací komoře se bude pohybovat okolo 850°C, za prvním tahem bude umístěn cyklónový odlučovač, který bude tuhé částice odlučovat a vracet zpět do fluidní vrstvy. Stěny prvního tahu jsou tvořeny membránovými stěnami z trubek TR 38x4, membránové stěny budou fungovat jako ohřívák vody. Rozměry II.tahu budou 2x2,5m a bude se skládat z membránových stěn, které budou po ohřívák vody I. Ohříváky vody budou ve II.tahu dva nad sebou, každý bude pracovat na teplotním spádu 30°C. Poslední teplosměnnou plochou bude trubkový ohřívák vzduchu. Mezi jednotlivými díly tepломěnných ploch bude mezera 0,8 m.

#### 4.4 Návrh cyklónového odlučovače

Cyklónový odlučovač slouží k odloučení únosu z fluidní vrstvy od spalin. Odloučené částice se poté vrací zpět do fluidní vrstvy ve spalovací komoře. Částice putují z odlučovače do spalovací komory přes fluidní uzávěr. Při volbě rozměrů cyklónu jsem vycházel z velikosti cyklónu pro kotel o výkonu 90MW.

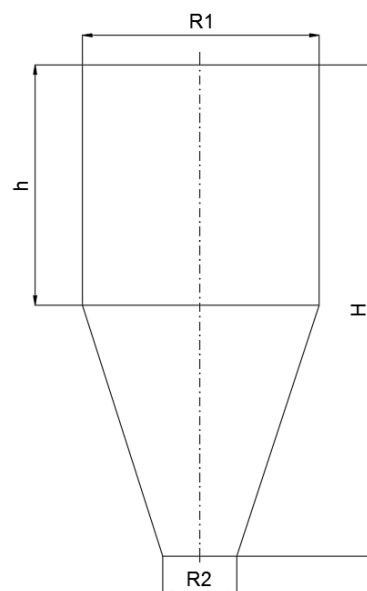
Vnitřní rozměry cyklónu pro kotel o výkonu 90 MW viz Obr. 4.4.1.

$$R1=3,125 \text{ m}$$

$$R2=6,20 \text{ m}$$

$$H=17,835 \text{ m}$$

$$h=5,632 \text{ m}$$



Obr.4.4.1. Rozměry vnitřní části cyklónu

- Objem válcové části

$$V_v = \pi * R1^2 * h = \pi * 3,125^2 * 5,632 \quad (4.4.1.)$$

$$V_v = 172,788 \text{ m}^3$$

- Objem komolého kužele

$$V_k = \frac{\pi * (H-h)}{3} * (R1^2 + R1 * R2 + R2^2) \quad (4.4.2.)$$

$$V_k = \frac{\pi * (17,835 - 5,632)}{3} * (3,125^2 + 3,125 * 6,2 + 6,2^2)$$

$$V_k = 594,319 \text{ m}^3$$

- Celkový objem

$$V_{90MW} = V_v + V_k = 172,780 + 594,319 = 767,107 \text{ m}^3 \quad (4.4.3.)$$

- Potřebný objem pro 15MW

$$V_{15MW} = \frac{V_{90MW}}{6} = \frac{767,107}{6} = 127,851 \text{ m}^3 \quad (4.4.4.)$$

- Zvoleny rozměry cyklónu pro 15 MW

Poloměry: R1=1,5m, R2=0,5m

H=11,3m

h=4 m

- Objem válcové části

$$V_v = \pi * R1^2 * h = \pi * 1,5^2 * 4 \quad (4.4.5.)$$

$$V_v = 28,981 \text{ m}^3$$

- Objem komolého kužele

$$V_k = \frac{\pi * (H-h)}{3} * (R1^2 + R1 * R2 + R2^2) \quad (4.4.6.)$$

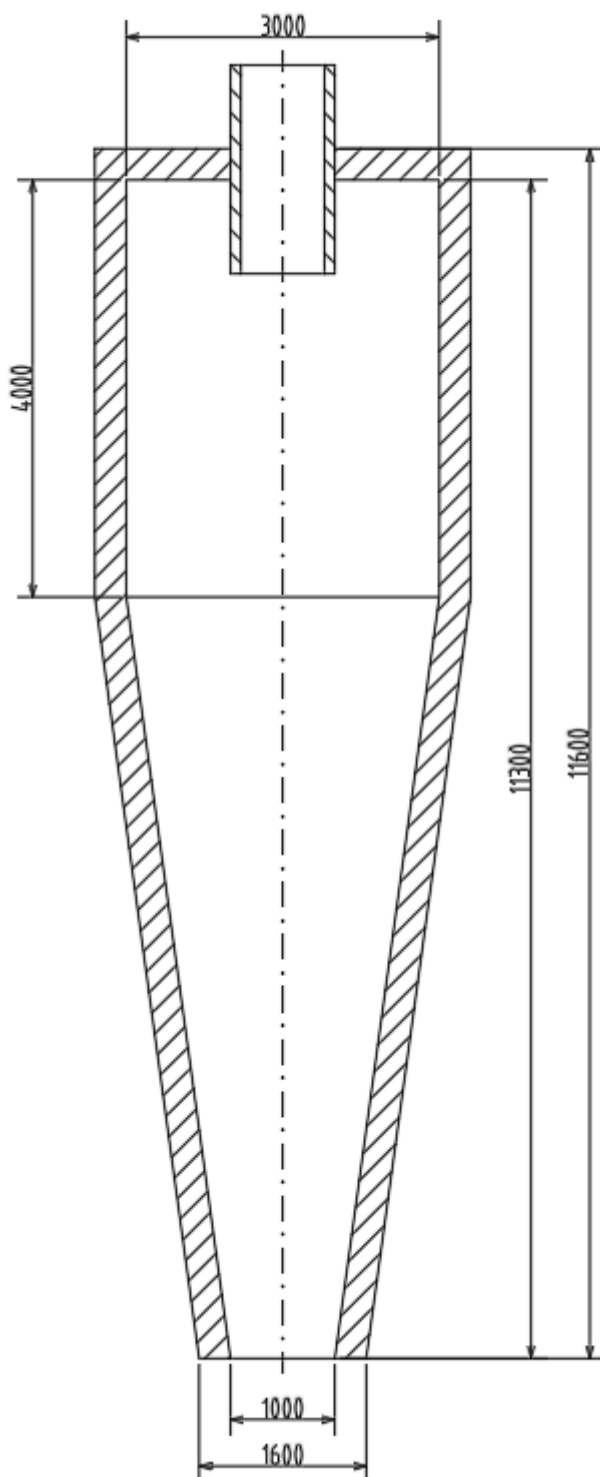
$$V_k = \frac{\pi * (11,3 - 4)}{3} * (1,5^2 + 1,5 * 0,5 + 0,5^2)$$

$$V_k = 99,379 \text{ m}^3$$

- Celkový objem

$$V_{90MW} = V_v + V_k = 28,981 + 99,379 = 128,36 \text{ m}^3 \quad (4.4.7.)$$

Celkový objem navrženého cyklónu vyhovuje 1/6 objemu cyklónu pro 90 MW. Tloušťka stěny cyklónu, plech včetně žáruvzdorné vyzdívky je 300 mm, viz náčrt Obr.4.4.3.



Obr.4.4.2 Cyklónový odlučovač pro 15 MW horkovodní kotel [mm]

## 5 Tepelný výpočet jednotlivých ploch

### 5.1 Výpočet ohříváku vzduchu

Ohříváky vzduchu nejčastěji nacházejí uplatnění u kotlů na tuhá paliva, kde se horký vzduch používá pro snadnější vznícení paliva a urychluje jeho vyhoření, někdy najde využití pro sušení paliva s nižším obsahem vody. Obecně ale platí, že vzduch musí mít tím vyšší teplotu, čím méně prchavé hořlaviny se v palivu nachází. U paliv s malým obsahem hořlavých látek pak vysoká teplota vzduchu výrazně pomáhá zvyšovat teplotu plamene a tím zlepšit přestup tepla v ohništi.

Hodnoty:

$$\text{průměr } D=0,034\text{m}$$

$$p_b = 0,101325 \text{ MPa}$$

$$d=0,03\text{m}$$

$$p_s = 0,0015 \text{ MPa}$$

$$\text{spaliny } t_{sp,in} = 350^\circ\text{C}$$

$$p_{VZ} = 0,0025 \text{ MPa}$$

$$t_{sp,out} = 120^\circ\text{C}$$

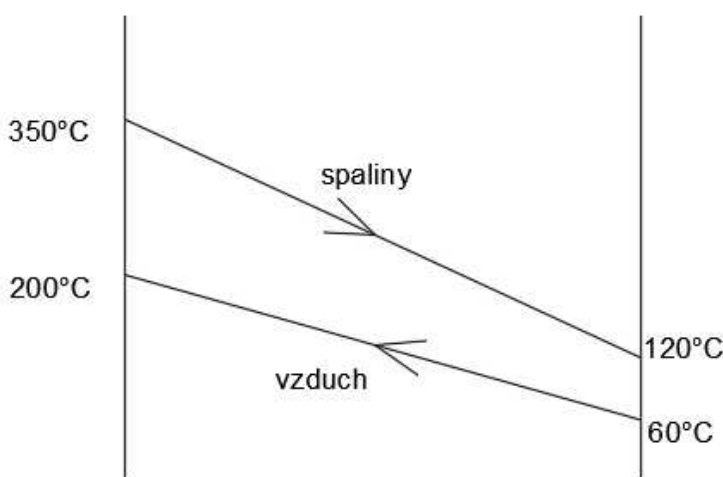
$$\beta_{ovz} = 1,3$$

$$\text{vzduch } t_{VZ,in} = 60^\circ\text{C}$$

$$W_s = 10 \text{ m/s}$$

$$t_{VZ,out} = 200^\circ\text{C}$$

$$W_{VZ} = 5,8 \text{ m/s}$$



Obr.5.1.1 Teplotní spád spaliny-vzduch



- Střední teplota spalin

$$t_{sp,střed} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{350 + 120}{2} \quad (5.1.1.)$$

$$t_{sp,střed} = 235^{\circ}\text{C}$$

- Střední teplota vzduchu

$$t_{vz,střed} = \frac{t_{vz,in} + t_{vz,out}}{2} = \frac{60 + 200}{2} \quad (5.1.2.)$$

$$t_{vz,střed} = 130^{\circ}\text{C}$$

- Skutečný průtok spalin

$$V_{sp,OVZ}^V = O_{sp,skut} * \frac{t_{sp,střed} + 273}{273} * \frac{p_b}{p_b - p_s} * m_{pal} \quad (5.1.3.)$$

$$V_{sp,OVZ}^V = 5,4127 * \frac{235 + 273}{273} * \frac{0,101325}{0,101325 - 0,0015} * 0,8426$$

$$V_{sp,OVZ}^V = 8,6142 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Skutečný průtok vzduchu OVZ

$$V_{vz,OVZ}^V = O_{vz,sk}^V * \beta_{OVZ} * \frac{t_{vz,střed} + 273}{273} * \frac{p_b}{p_b + p_{vz}} * m_{pal} \quad (5.1.4.)$$

$$V_{vz,OVZ}^V = 4,7989 * 1,3 * \frac{130 + 273}{273} * \frac{0,101325}{0,101325 + 0,0025} * 0,8426$$

$$V_{vz,OVZ}^V = 7,5729 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Potřebný počet trubek

$$n_{tr} = \frac{4 * V_{sp,OVZ}^V}{w_s * \pi * d^2} = \frac{4 * 8,6142}{10 * \pi * 0,03^2} = 1218 \text{ kusů} \Rightarrow \text{voleno } 1221 \quad (5.1.5.)$$

trubek v řadě  $z_1 = 37$  ; počet řad  $z_2 = 33$

rozteče mezi trubkami  $S_1 = 0,06 \text{ m}$  ;  $S_2 = 0,06 \text{ m}$

- Poměrná rozteč

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} = \frac{0,06}{0,034} = 1,76 \quad (5.1.6)$$

- Poměrná podélná rozteč

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,06}{0,034} = 1,76 \quad (51.7.)$$

$$\sigma'_2 = \sqrt{0,25 * \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0,25 * 1,76^2 + 1,76^2} = 1,968$$

- Parametr  $\Phi$

$$\Phi = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{1,76 - 1}{1,968 - 1} = 0,785 \quad (5.1.8.)$$

- Korekční součinitel na uspořádání svazku

$$C_s = 0,340 * \Phi^{0,5} = 0,340 * 0,785^{0,5} = 0,332 \quad (5.1.9.)$$

- Hloubka OVZ

$$b = (z_2 - 1) * S_2 = (34 - 1) * 0,06 = 1,98 \text{ m} \quad (5.1.10.)$$

- Korekce rychlosti spalín

$$W_{sp} = \frac{4 * V_{sp,OVZ}^V}{n_{tr} * \pi * d^2} = \frac{4 * 8,6142}{1221 * \pi * 0,03^2} = 9,956 \text{ m/s} \quad (5.1.11.)$$

- Výška jednoho obratu

$$h = \frac{V_{VZ,OVZ} * S_1}{a * W_{VZ} * (S_1 - D)} = \frac{7,5729 * 0,06}{2,5 * 5,8 * (0,06 - 0,034)} = 1,2 \text{ m} \quad (5.1.12.)$$

- Součinitel přestupu tepla spalín

Hodnoty pro spaliny o teplotě 235°C

$$\lambda_{sp} = 0,043 \text{ W/mK}$$

$$Pr = 0,66$$

$$\nu_{sp} = 0,0000488 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\alpha_s = C_z * C_s * \frac{\lambda_{sp}}{d} * \left( \frac{W_{sp} * d}{\nu_{sp}} \right)^{0,6} * Pr^{0,33} \quad (5.1.13.)$$

$$\alpha_s = 1 * 0,332 * \frac{0,043}{0,03} * \left( \frac{9,956 * 0,03}{0,0000488} \right)^{0,6} * 0,66^{0,33} = 77,6680 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

- Součinitel přestupu vzduchu

Hodnoty pro vzduch o teplotě 130°C  $\lambda_{sp} = 0,034 \text{ W/mK}$

$$Pr = 0,69$$

$$\nu_{sp} = 0,00002668 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\alpha_{VZ} = C_z * C_s * \frac{\lambda_{sp}}{D} * \left( \frac{W_{sp} * D}{\nu_{sp}} \right)^{0,6} * Pr^{0,33} \quad (5.1.14.)$$

$$\alpha_{VZ} = 1 * 0,332 * \frac{0,043}{0,034} * \left( \frac{5,8 * 0,034}{0,00002668} \right)^{0,6} * 0,69^{0,33} = 61,5447 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

- Součinitel prostupu tepla

součinitel využití ohříváku vzduchu pro trubkový ohřívák bez mezitrubkovnic  $\xi = 0,85$

$$k = \xi * \frac{\alpha_{VZ} * \alpha_s}{\alpha_{VZ} + \alpha_s} = 0,85 * \frac{61,5447 * 77,6680}{61,5446 + 77,6680} = 29,21 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (5.1.15.)$$

- Teplotní rozdíl vzduchu

$$t'_m = t_{VZ,out} - t_{VZ,in} = 200 - 60 = 140^\circ\text{C} \quad (5.1.16.)$$

- Teplotní rozdíl spalin

$$t'_{sp} = t_{sp,out} - t_{sp,in} = 350 - 120 = 230^\circ\text{C} \quad (5.1.17.)$$

- Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \Psi * \frac{(t_{sp,in} - t_{VZ,out}) - (t_{sp,out} - t_{VZ,in})}{\ln \frac{(t_{sp,in} - t_{VZ,out})}{(t_{sp,out} - t_{VZ,in})}} \quad (5.1.18.)$$

$\Psi$  je korekční součinitel přechodu od protiproudého zapojení ke kombinovanému a určuje se z nomogramu, pro jeho určení je zapotřebí vypočítat parametr "P" a "R"

Parametr R

$$R = \frac{t'_{sp}}{t'_m} = \frac{230}{140} = 1,643 \quad (5.1.19.)$$

Parametr P

$$P = \frac{t'_m}{t_{sp,in} - t_{VZ,in}} = \frac{140}{350 - 60} = 0,48 \quad (5.1.20.)$$

z nomogramu byl zvolen  $\Psi = 0,9$

$$\Delta t = 0,9 * \frac{(350 - 200) - (120 - 60)}{\ln \frac{(350 - 200)}{(120 - 60)}} = 88,40^\circ\text{C} \quad (5.1.21.)$$

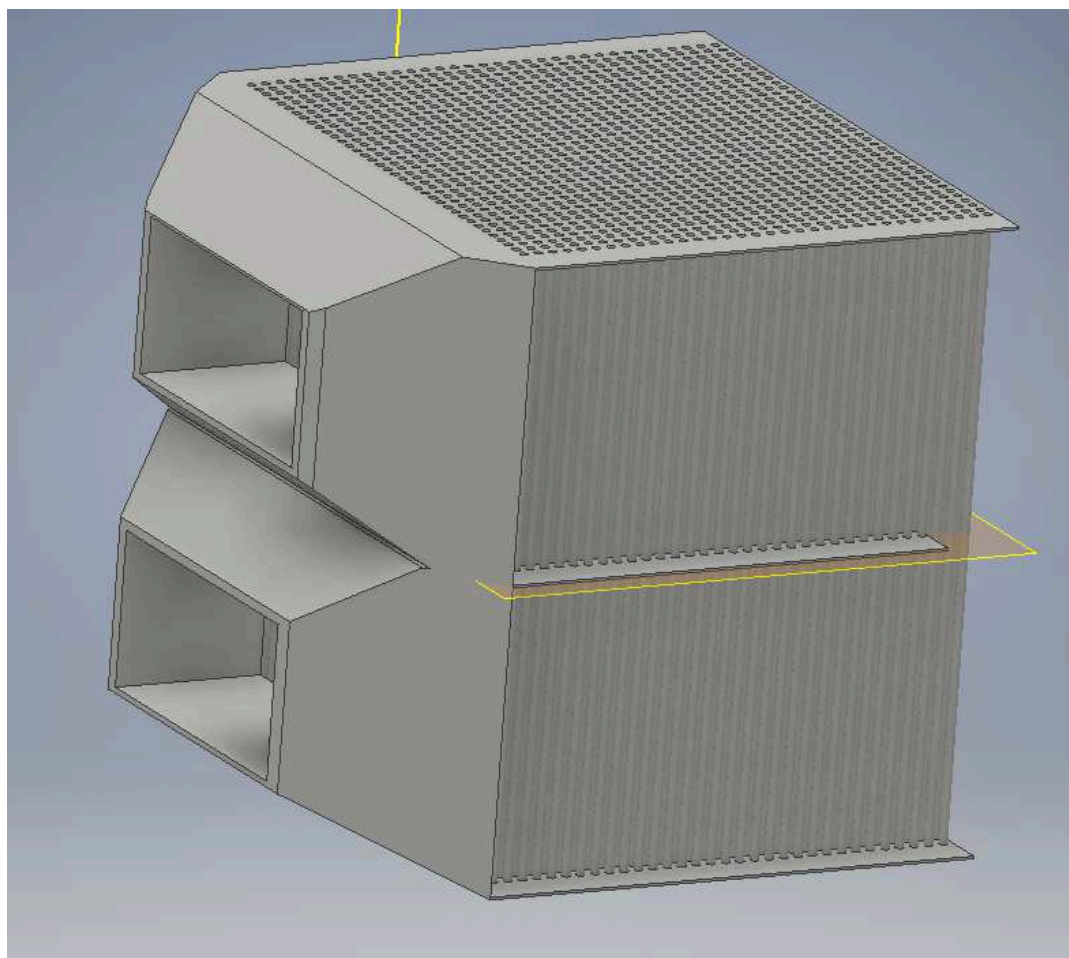
- Velikost výhřevné plochy

při výšce jednoho obrátu  $h=1,2\text{m}$  celkovém počtu obrátů  $i=2$  je celková výška ohříváku vzduchu  $H=2,4\text{m}$

$$S_{OVZ} = 2 * \pi * \frac{D}{2} * H * n_{tr} = 2 * \pi * \frac{0,034}{2} * 2,4 * 1221 = 313,77 \text{ m}^2 \quad (5.1.22.)$$

- Výkon ohříváku vzduchu

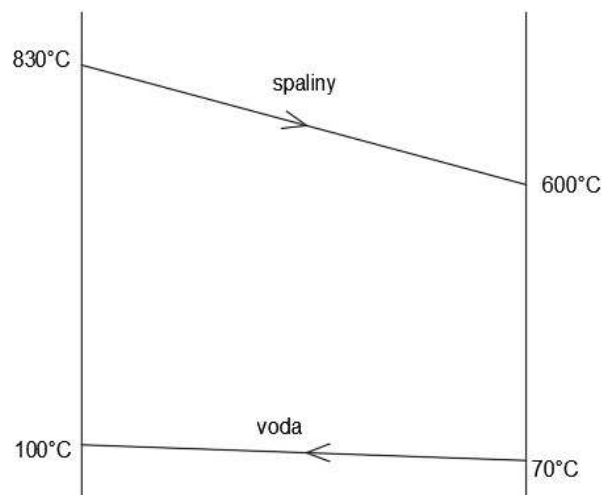
$$Q_{OVZ} = \frac{S_{OVZ} * \Delta t * k}{1000} = \frac{313,77 * 88,40 * 29,21}{1000} = 810,22 \text{ kW} \quad (5.1.23.)$$



Obr.5.1.2 Ohřívák vzduchu

## 5.2 Ohřívák vody I

šířka kanálu	$a=2,5\text{m}$
hloubka kanálu	$b=2\text{m}$
trubky ohříváku vody	$D=0,038\text{m}$
	$t_r=0,0032\text{m}$
rozteče	$S_1 = 0,088\text{m}$
	$S_2 = 0,058\text{m}$
rychlost spalin	$w_s = 10 \text{ m/s}$
rychlost vody	$w_{np} = 0,5 \text{ m/s}$
teplota spalin	$t_{sp,in} = 830 \text{ }^\circ\text{C}$
	$t_{sp,out} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$
teplota vody	$t_{np,in} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$
	$t_{np,out} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$



Obr.5.2.1 Teplotní spád OV I. spaliny-voda

- Střední teplota spalin

$$t_{střed} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{830 + 600}{2} = 715 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.2.1.)$$

- Průřez spalin

$$F_{pr} = a * b = 2,5 * 2 = 5\text{m}^2 \quad (5.2.2.)$$

- Střední objem vlhkých spalin

$$\alpha_{eko} = 1,3$$

$$V_{střed,sp}^v = O_{sp,min}^v + (\alpha_{eko} - 1) * O_{VZ,min}^v = 4,9764 + (1,3 - 1) * 4,3627 \quad (5.2.3.)$$

$$V_{střed,sp}^v = 6,2852\text{m}^3/\text{kg}$$

- Skutečný průtok spalin v ohřívačce vody I

$$P_b = 0,101325 \text{ MPa}$$

$$P_{sp} = 0,0015 \text{ MPa}$$

$$V_{sp,EKO}^v = V_{střed,sp}^v * \frac{t_{střed} + 273}{273} * \frac{P_b}{P_b - P_{sp}} * m_{pal} \quad (5.2.4.)$$

$$V_{sp,EKO}^v = 6,2852 * \frac{715 + 273}{273} * \frac{0,101325}{0,101325 - 0,0015} * 0,8426 = 19,454 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Součinitel přestupu tepla

pro spaliny o teplotě 715°C

$$\lambda_{sp} = 0,0835 \text{ W/mK}$$

$$Pr = 0,59$$

$$v_{sp} = 0,000111 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\alpha_k = 0,2 * C_z * C_s * \frac{\lambda_{sp}}{D} * \left( \frac{W_{sp} * D}{v_{sp}} \right)^{0,6} * Pr^{0,33} \quad (5.2.5.)$$

$C_z = 1$  při počtu řad v podélném směru  $z_2 \geq 10$

- Oprava uspořádání svazku

$$C_s = \frac{1}{(1 + (2 * \sigma_1 - 3) * \left(1 - \frac{\sigma_2}{2}\right)^3)^2} \quad (5.2.6.)$$

$$C_s = \frac{1}{(1 + (2 * 2,316 - 3) * \left(1 - \frac{1,526}{2}\right)^3)^2} = 0,9579$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,088}{0,038} = 2,316 \quad (5.2.7.)$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,058}{0,038} = 1,526 \quad (5.2.8.)$$

$$\alpha_k = 0,2 * 1 * 0,9279 * \frac{0,0835}{0,038} * \left( \frac{10 * 0,038}{0,000111} \right)^{0,6} * 0,59^{0,33} \quad (5.2.9.)$$

$$\alpha_k = 70,1510 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

- Součinitel tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 * 10^{-8} * \frac{a_{st}+1}{2} * a * T^3 * \frac{1 - (\frac{T_z}{T})^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (5.2.10.)$$

$$\alpha_s = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,248 * 988,15^3 * \frac{1 - (\frac{418,15}{988,15})^4}{1 - \frac{418,15}{988,15}} = 20,32 \frac{W}{m^2 K}$$

$a_{st} = 0,8$  stupeň černosti povrchu stěn

- Stupeň černosti proudy spalín

$$a = 1 - e^{-k * p * s} = 1 - e^{-23,812 * 0,1 * 0,1197} = 0,248 \quad (5.2.11.)$$

$$k = k_s * r_s = 79,136 * 0,3009 = 23,812 \quad (5.2.12.)$$

$$s = 0,9 * D * \left( \frac{4}{\pi} * \frac{s_1 * s_2}{D^2} - 1 \right) \quad (5.2.13.)$$

$$s = 0,9 * 0,038 * \left( \frac{4}{\pi} * \frac{0,088 * 0,058}{0,038^2} - 1 \right) = 0,1197$$

- Součinitel zeslabení tříatomovými plyny

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 * r_{H_2O}}{3,16 * \sqrt{p_s * s}} - 1,02 \right) * \left( 1 - 0,37 * \frac{t_s + 273}{1000} \right) \quad (5.2.14.)$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 * 0,1538}{3,16 * \sqrt{0,03 * 0,1197}} - 1,02 \right) * \left( 1 - 0,37 * \frac{715 + 273}{1000} \right) = 79,136 \frac{1}{m MPa}$$

- Objemová koncentrace vodní páry

$$r_{H_2O} = \frac{O_{sp}^{H_2Omin} + (f-1) * (\alpha_s - 1) * O_{vz,min}^s}{O_{sp,min}^v + (\alpha_s - 1) * O_{vz,min}^v} \quad (5.2.15.)$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,8254 + (1,0168 - 1) * (1,1 - 1) * 4,2906}{4,9764 + (1,1 - 1) * 4,3627} = 0,1538 [-]$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{sp,min}^v + (\alpha_s - 1) * O_{vz,min}^v} = \frac{0,79 + 0,0057}{49764 + (1,1 - 1) * 4,3627} = 0,1472 [-]$$

$$r_s = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,1538 + 0,1472 = 0,3009 \quad (5.2.16.)$$

$$p_s = r_s * p = 0,3009 * 0,1 = 0,03 MPa \quad (5.2.17.)$$

$p = 0,1 \text{ MPa}$  tlak spalin se běžně bere

- Teplota nánosů na vnějším povrchu trubek

$$T_z = t_{m, \text{střed}} + \Delta t + 273,15 = 85 + 60 + 273,15 = 418,15 \quad (5.2.18.)$$

$\Delta t = 60^\circ \text{C}$  pro vstup spalin do ohříváku vody o teplotě  $>400^\circ \text{C}$

$$t_{m, \text{střed}} = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{70 + 100}{2} = 85^\circ \text{C} \quad (5.2.19.)$$

- Součinitel přestupu a sálení

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_k = 70,151 + 20,3200 = 90,4710 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad (5.2.20.)$$

- Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_1 = t_{sp, out} - t_{np, in} = 600 - 70 = 530^\circ \text{C} \quad (5.2.21.)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp, in} - t_{np, out} = 830 - 100 = 730^\circ \text{C} \quad (5.2.22.)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} \Delta t = \frac{530 - 730}{\ln\left(\frac{530}{730}\right)} = 624^\circ \text{C} \quad (5.2.23.)$$

- Součinitel zanesení

$$\varepsilon = C_d * C_f * \varepsilon_0 + \Delta \varepsilon \quad (5.2.24.)$$

$$\varepsilon = 0,75 * 0,002 + 0,0015 = 0,003 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

$\varepsilon_0 = 0,002 \text{ m}^2 \text{K/W}$  byl zvolen dle diagramu ve zdroji [3]

$\Delta \varepsilon = 0,0015 \text{ m}^2 \text{K/W}$  pro ohřívák vody  $t > 400^\circ \text{C}$

$C_d = 0,75$  opravný koeficient na průměr trubek

- Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha}{1 + \varepsilon * \alpha} = \frac{90,4710}{1 + 0,003 * 90,4710} = 71,1578 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad (5.2.25.)$$



- Výkon ohříváku vody I

$$Q_{OV I} = M_{vody OV I} * \Delta i = 25 * 125,88 = 3\,147\,kW \quad (5.2.26.)$$

$$i_{vstup(70^{\circ}C)} = 293,72\,kJ/kg$$

$$i_{vystup(100^{\circ}C)} = 419,6\,J/kg$$

$M_{vody OV I} = 25\,dm^3/s$  do ekonomizéru je pomocí regulačních ventilů pouštěna jen část z celkového množství vody  $M_{vody} = 59,197\,dm^3/s$ .

- Výhřevná plocha ohříváku vody I

$$S_{OV} = \frac{Q_{OV I}}{k * \Delta t} = \frac{3\,147\,000}{71,1578 * 624} = 70,87\,m^2 \quad (5.2.27.)$$

- Počet trubek pro vstup vody

viskozita vody pro střední teplotu  $85^{\circ}C$   $\vartheta_{np} = 0,00109655\,m^3/kg$

$$n_{tr} = \frac{4 * M_{vody OV I} * \vartheta_{np}}{\pi * (D - 2t_r)^2 * w_{np}} \quad (5.2.28.)$$

$$n_{tr} = \frac{4 * 25 * 0,00109655}{\pi * (0,038 - 2 * 0,0032)^2 * 0,5}$$

$$n_{tr} = 69,9092\,kusů \Rightarrow 70\,kusů$$

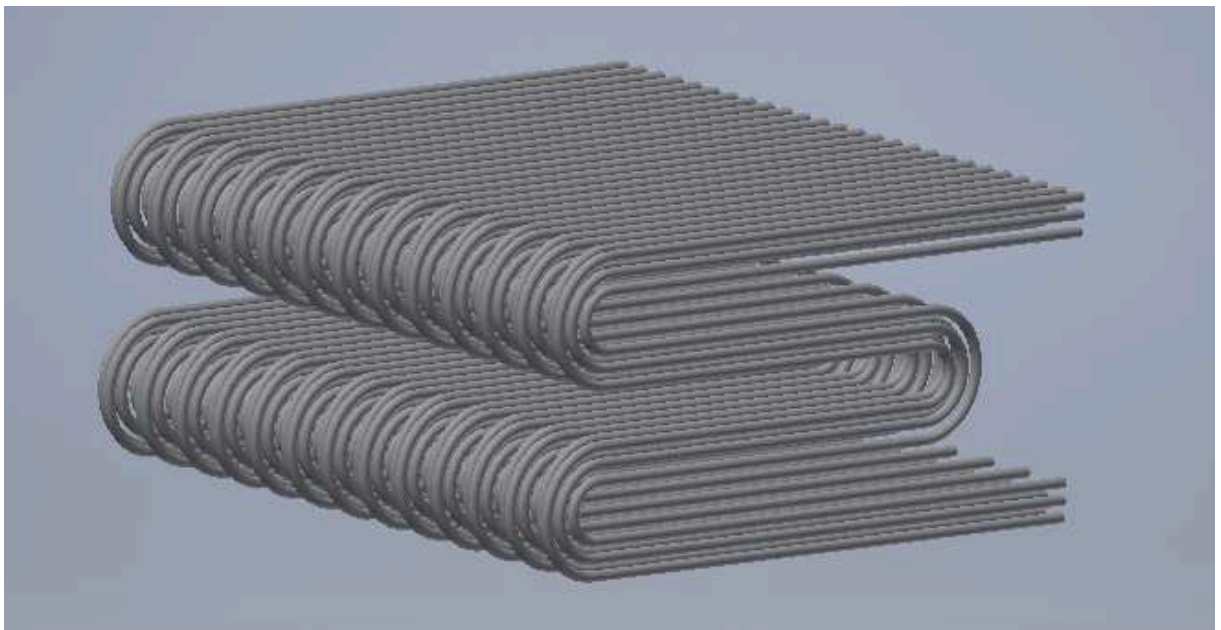
- Délka jedné trubky

$$L = \frac{S_{OV}}{n_{tr} * \pi * D} = \frac{70,87}{70 * \pi * 0,038} = 8,48\,m \quad (5.2.29.)$$

- Výška svazku včetně mezery dělící ohřívák vody II na dva díly

budou 2 řady trubek po 28 kusech a 1 řada po 14 kusech, celkem  $z=3$  řady  
počet obrátů s délkou trubek 2m  $i=4$

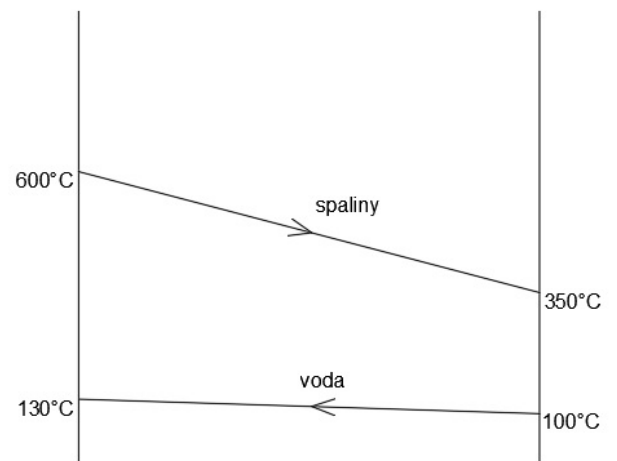
$$H = i * (z * s_2 + m_{mezera}) = 4 * (3 * 0,058 + 0,16) = 1,336\,m \quad (5.2.30.)$$



Obr.5.2.2. Model ohřívačů vody I

### 5.3 Ohřívač vody II

šířka kanálu	$a=2,5\text{m}$
hloubka kanálu	$b=2\text{m}$
trubky ohřívačů vody	$D=0,038\text{m}$ $t_r=0,0032\text{m}$
rozteče	$S_1 = 0,088\text{m}$ $S_2 = 0,058\text{m}$
rychlost spalin	$w_s = 10 \text{ m/s}$
rychlost vody	$w_{np} = 0,5 \text{ m/s}$
teplota spalin	$t_{sp,in} = 600^\circ\text{C}$ $t_{sp,out} = 350^\circ\text{C}$
teplota vody	$t_{np,in} = 100^\circ\text{C}$ $t_{np,out} = 130^\circ\text{C}$



Obr.5.3.1 Teplotní spád OV II spaliny-voda

- Střední teplota spalin

$$t_{střed} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{600 + 350}{2} = 475^\circ\text{C} \quad (5.3.1.)$$

- Průřez spalin

$$F_{pr} = a * b = 2,5 * 2 = 5m^2 \quad (5.3.2.)$$

- Střední objem vlhkých spalin

$$\alpha_{OV} = 1,3$$

$$V_{střed,sp}^v = O_{sp,min}^v + (\alpha_{eko} - 1) * O_{VZ,min}^v = 4,9764 + (1,3 - 1) * 4,3627 \quad (5.3.3.)$$

$$V_{střed,sp}^v = 6,2852m^3/kg$$

- Skutečný průtok spalin v ohříváku vody II

$$P_b = 0,101325 \text{ MPa}$$

$$P_{sp} = 0,0015\text{MPa}$$

$$V_{sp,EKO}^v = V_{střed,sp}^v * \frac{t_{střed}+273}{273} * \frac{P_b}{P_b-P_{sp}} * m_{pal} \quad (5.3.4.)$$

$$V_{sp,EKO}^v = 6,2852 * \frac{715 + 273}{273} * \frac{0,101325}{0,101325 - 0,0015} * 0,8426 = 19,454 \text{ m}^3/s$$

- Součinitel přestupu tepla

pro spaliny o teplotě 475°C

$$\lambda_{sp} = 0,0628 \text{ W/mK}$$

$$Pr = 0,63$$

$$\nu_{sp} = 0,000069 \text{ m}^2/s$$

$$\alpha_k = 0,2 * C_z * C_s * \frac{\lambda_{sp}}{D} * \left( \frac{W_{sp}*D}{\nu_{sp}} \right)^{0,6} * Pr^{0,33} \quad (5.3.5.)$$

$C_z = 1$  při počtu řad v podélném směru  $z_2 \geq 10$

- Oprava uspořádání svazku

$$C_s = \frac{1}{(1+(2*\sigma_1-3)*(1-\frac{\sigma_2}{2})^3)^2} \quad (5.3.6.)$$

$$C_s = \frac{1}{(1 + (2 * 2,316 - 3) * (1 - \frac{1,526}{2})^3)^2} = 0,9579$$

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D} = \frac{0,088}{0,038} = 2,316 \quad (5.3.7.)$$

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{D} = \frac{0,058}{0,038} = 1,526 \quad (5.3.8.)$$

$$\alpha_k = 0,2 * 1 * 0,9279 * \frac{0,0628}{0,038} * \left( \frac{10 * 0,038}{0,000069} \right)^{0,6} * 0,63^{0,33}$$

$$\alpha_k = 73,4372 \frac{W}{m^2 K}$$

- Součinitel tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 * 10^{-8} * \frac{a_{st}+1}{2} * a * T^3 * \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (5.3.9.)$$

$$\alpha_s = 5,7 * 10^{-8} * \frac{0,8 + 1}{2} * 0,248 * 748,15^3 * \frac{1 - \left(\frac{448,15}{748,15}\right)^4}{1 - \frac{448,15}{748,15}} = 11,1865 \frac{W}{m^2 K}$$

$a_{st} = 0,8$  stupeň černosti povrchu stěn

- Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k * p * s} = 1 - e^{-23,812 * 0,1 * 0,1197} = 0,248 \quad (5.3.10.)$$

$$k = k_s * r_s = 79,136 * 0,3009 = 23,812 \quad (5.3.11.)$$

$$s = 0,9 * D * \left( \frac{4}{\pi} * \frac{S_1 * S_2}{D^2} - 1 \right) \quad (5.3.12.)$$

$$s = 0,9 * 0,038 * \left( \frac{4}{\pi} * \frac{0,088 * 0,058}{0,038^2} - 1 \right) = 0,1197$$

- Součinitel zeslabení tříatomovými plyny

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 * r_{H_2O}}{3,16 * \sqrt{p_s * s}} - 1,02 \right) * \left( 1 - 0,37 * \frac{t_s + 273}{1000} \right) \quad (5.3.13.)$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 * 0,1538}{3,16 * \sqrt{0,03 * 0,1197}} - 1,02 \right) * \left( 1 - 0,37 * \frac{715 + 273}{1000} \right) = 79,136 \frac{1}{m MPa}$$

- Objemová koncentrace vodní páry

$$r_{H_2O} = \frac{o_{sp}^{H_2Omin} + (f-1) * (\alpha_s - 1) * o_{vz,min}^s}{o_{sp,min}^v + (\alpha_s - 1) * o_{vz,min}^v} \quad (5.3.14.)$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,8254 + (1,0168 - 1) * (1,1 - 1) * 4,2906}{4,9764 + (1,1 - 1) * 4,3627} = 0,1538 [-]$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{sp,min}^v + (\alpha_s - 1) * O_{vz,min}^v} = \frac{0,79 + 0,0057}{49764 + (1,1 - 1) * 4,3627} = 0,1472 [-]$$

$$r_s = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,1538 + 0,1472 = 0,3009 \quad (5.3.15.)$$

$$p_s = r_s * p = 0,3009 * 0,1 = 0,03 \text{ MPa} \quad (5.3.16.)$$

$p = 0,1 \text{ MPa}$  tlak spalín se běžně bere

- Teplota nánosů na vnějším povrchu trubek

$$T_z = t_{m,střed} + \Delta t + 273,15 = 115 + 60 + 273,15 = 448,15^\circ\text{C} \quad (5.3.17.)$$

$\Delta t = 60^\circ\text{C}$  pro vstup spalín do ohřívák vody o teplotě  $>400^\circ\text{C}$

$$t_{m,střed} = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{100 + 130}{2} = 115^\circ\text{C} \quad (5.3.18.)$$

- Součinitel přestupu a sálení

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_k = 73,4372 + 11,1865 = 84,6237 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (5.3.19.)$$

- Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_1 = t_{sp,out} - t_{np,in} = 350 - 100 = 250^\circ\text{C} \quad (5.3.20.)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp,in} - t_{np,out} = 600 - 130 = 470^\circ\text{C} \quad (5.3.21.)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} \Delta t = \frac{530 - 730}{\ln\left(\frac{530}{730}\right)} = 348,5^\circ\text{C} \quad (5.3.22.)$$

- Součinitel zanesení

$$\varepsilon = C_d * C_f * \varepsilon_0 + \Delta \varepsilon \quad (5.3.23.)$$

$$\varepsilon = 0,75 * 0,002 + 0,0015 = 0,003 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$\varepsilon_0 = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$  byl zvolen dle diagramu ve zdroji [3]

$\Delta \varepsilon = 0,0015 \text{ m}^2\text{K/W}$  pro ohřívák vody  $t > 400^\circ\text{C}$

$C_d = 0,75$  opravný koeficient na průměr trubek

- Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha}{1+\varepsilon\alpha} = \frac{84,6237}{1+0,003*84,6237} = 67,4899 \frac{W}{m^2K} \quad (5.3.24.)$$

- Výkon ohříváku vody II

$$Q_{OV II} = M_{vody OV} * \Delta i = 25 * 125,88 = 3\,147\,kW \quad (5.3.25.)$$

$$i_{vstup(130^\circ C)} = 545,48 kJ/kg$$

$$i_{vystup(100^\circ C)} = 419,6 J/kg$$

$M_{vody OV} = 25\,dm^3/s$  do ekonomizéru je pomocí regulačních ventilů pouštěna jen část z celkového množství vody  $M_{vody} = 59,197\,dm^3/s$ .

- Výhřevná plocha ohříváku vody

$$S_{OV} = \frac{Q_{OV II}}{k * \Delta t} = \frac{3\,147\,000}{67,4899 * 348,5} = 133,78 m^2 \quad (5.3.26.)$$

- Počet trubek pro vstup vody

viskozita vody pro střední teplotu  $115^\circ C$   $\vartheta_{np} = 0,0011092\,m^3/kg$

$$n_{tr} = \frac{4 * M_{vody OV I} * \vartheta_{np}}{\pi * (D - 2t_r)^2 * w_{np}} \quad (5.3.27.)$$

$$n_{tr} = \frac{4 * 25 * 0,0011092}{\pi * (0,038 - 2 * 0,0032)^2 * 0,5}$$

$$n_{tr} = 70,71 kusů \Rightarrow 70\,kusů\,zvýšení\,rychlosti\,je\,zanedbatelné$$

- Délka jedné trubky

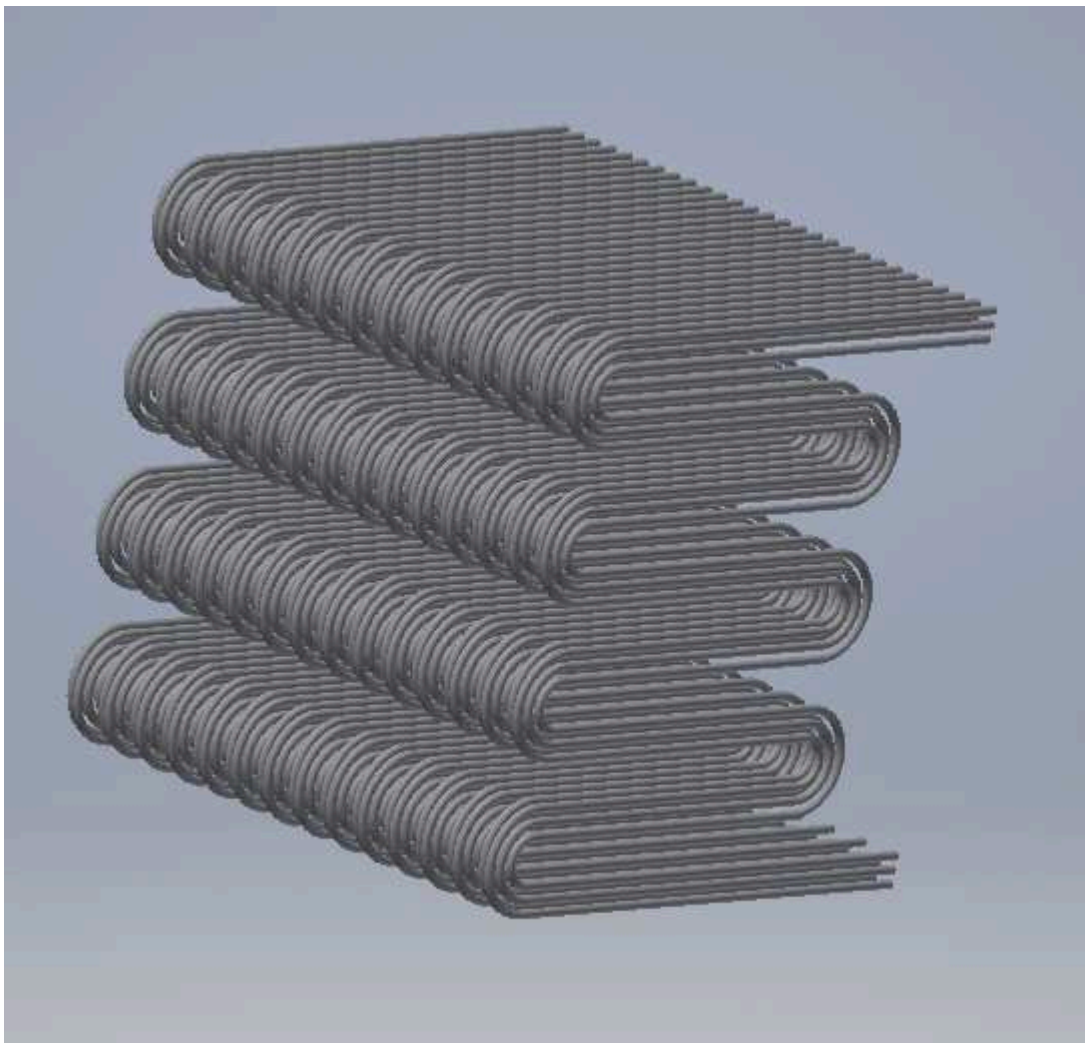
$$L = \frac{S_{OV}}{n_{tr} * \pi * D} = \frac{133,78}{70 * \pi * 0,038} = 16,001\,m \quad (5.3.28.)$$

- Výška svazku včetně mezery dělíci ohřívák vody II na dva díly

budou 2 řady trubek po 28 kusech a 1 řada po 14 kusech, celkem  $z=3$  řady

počet obratu s délkou trubek  $2m$   $i=8$

$$H = i * (s_2 + m_{mezera}) = 8 * (3 * 0,058 + 0,1) = 2,2m \quad (5.3.29.)$$



Obr. 5.3.2 Model ohříváku vody II

#### 5.4 Membránové stěny ve spalovací komoře

Nad ohništěm spalovací komory se nachází membránové stěny, ty jsou tvořeny svařenci trubek Tr 38x4 s praporky o tloušťce 4mm, rozteč mezi trubkami je 17,3 mm. Výška spalovací komory je 22 m, membránové stěny v prvním tahu se skládají z celkem 152 trubek, kterými proudí napájecí voda o teplotě 70°C, která se následně ohřeje na 130°C. Tlak napájecí vody je 1,4MPa. Membránové stěny mají plochu  $S=190,912\text{m}^2$ .

Po konzultaci, přepočtech rozměrů a výkonů kotle NK14, byla pomocí výpočtů určena hodnota součinitele přestupu tepla, která má hodnotu  $k = 54 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ . Střední logaritmický průměr ve spalovací komoře je  $\Delta t = 754,72^\circ\text{C}$

- Výkon membránových ohříváku ve spalovací komoře

$$Q_{mem.st.SK} = \frac{S_{mem.st.SK} \cdot k \cdot \Delta t}{1000} = \frac{190,912 \cdot 54 \cdot 754,72}{1000} = 7\,780,5956 \text{ kW} \quad (5.4.1.)$$

$$M_{vody SK} = \frac{Q_{mem.st.SK}}{\Delta i} = \frac{7780,5956}{125,88} = 30,9 \text{ kg/s} \quad (5.4.2.)$$

- Zbylé množství vody potřebné pro ohřátí

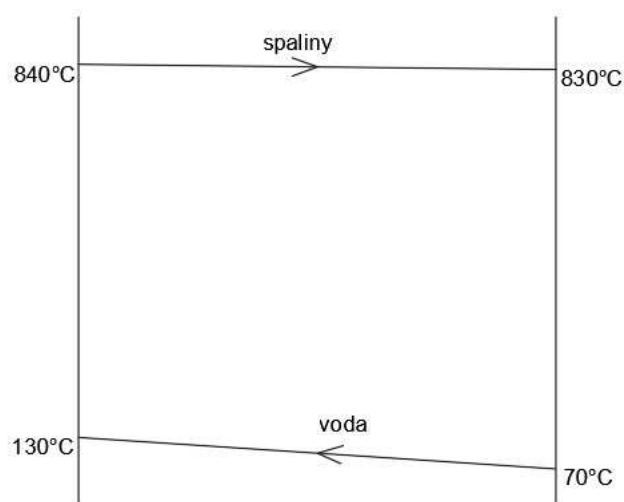
je rozdíl celkové napájecí vody a vody přivedené do ohříváku v II.tahu a do membránového ohříváku ve spalovací komoře. Zbylé množství vody se bude ohřívat v membránovém ohříváku, který se nachází u vstupu do II.tahu umístěném před ohříváky vody a ohřívákem vzduchu.

$$M_{vody mem.II.tah} = M_{vody} - M_{vody SK} - M_{vody OV} \quad (5.4.3.)$$

$$M_{vody mem.II.tah} = 59,5806 - 30,9 - 25 = 3,6806 \text{ kg/s}$$

## 5.5 Návrh membránového ohříváku v II. tahu

šířka kanálu	a=2,5m
hloubka kanálu	b=2m
trubky ohříváku vody	D=0,038m tr=0,004m
rychlost spalin	w <sub>s</sub> = 10 m/s
rychlost vody	w <sub>np</sub> = 0,5 m/s
teplota spalin	t <sub>sp,in</sub> = 840°C t <sub>sp,out</sub> = 830°C
teplota vody	t <sub>np,in</sub> = 70°C t <sub>np,out</sub> = 130°C



Obr.5.5.1 Teplotní spád spaliny-voda

- Střední teplotní spád

$$t_{stř} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} = \frac{840 + 830}{2} = 835^\circ\text{C} \quad (5.5.1.)$$



- Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F_{sp}}{O_{II.tah}} \quad (5.5.2.)$$

světlý průřez spalin  $F_{sp} = a \cdot b = 2 \cdot 2,5 = 5m^2$  (5.5.3.)

obvod II.tahu  $O_{II.tah} = 2 \cdot (a + b) = 2 \cdot (2,5 + 2) = 9m$  (5.5.4.)

$$d_e = \frac{4 \cdot 5}{9} = 2,22m$$

- Součinitel přestupu tepla konvekci

$$\lambda = 0,0935 \text{ W/mK}; \vartheta = 0,000136 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 0,59$$

$$\alpha_k = 0,23 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w_s \cdot d_e}{\vartheta} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (5.5.5.)$$

$$\alpha_k = 0,23 \cdot \frac{0,0935}{2,22} \cdot \left( \frac{10 \cdot 2,22}{0,000136} \right)^{0,8} \cdot 0,59^{0,4} = 116,0856 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

- Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st}+1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^4}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (5.5.6.)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8+1}{2} \cdot 0,141 \cdot 1108,15^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{453,15}{1108,15}\right)^4}{1 - \frac{453,15}{1108,15}} = 16,7807 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$a_{st} = 0,8 \text{ stupeň černosti povrchu stěn}$$

- Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,211 \cdot 0,1 \cdot 7,2} = 0,141 \quad (5.5.7.)$$

- Součinitel zeslabení sálavé vrstvy

$$k = k_s \cdot r_s = 0,7017 \cdot 0,3009 = 0,211 \quad (5.5.8.)$$

- Tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_{sp}}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{10}{5} = 7,2 \text{ m} \quad (5.5.9.)$$

- Objem sálajícího prostoru

$$V_{sp} = a * b * h = 2 * 2,5 * 2 = 10m^3 \quad (5.5.10.)$$

- Plocha sálajícího prostoru

$$F_{st} = a * b = 2 * 2,5 = 5m^2 \quad (5.5.11.)$$

- Součinitel zeslabení tříatomovými plyny

$$k_s = \left( \frac{7,8+16*r_{H_2O}}{3,16*\sqrt{p_s*S}} - 1,02 \right) * \left( 1 - 0,37 * \frac{t_s+273}{1000} \right) \quad (5.5.12.)$$

$$k_s = \left( \frac{7,8 + 16 * 0,1538}{3,16 * \sqrt{0,03 * 7,2}} - 1,02 \right) * \left( 1 - 0,37 * \frac{835 + 273}{1000} \right) = 0,7017 \frac{1}{m \text{ MPa}}$$

- Objemová koncentrace vodní páry

$$r_{H_2O} = \frac{O_{sp}^{H_2Omin} + (f-1)*(\alpha_s-1)*O_{vz,min}^s}{O_{sp,min}^v + (\alpha_s-1)*O_{vz,min}^v} \quad (5.5.13.)$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,8254 + (1,0168 - 1) * (1,1 - 1) * 4,2906}{4,9764 + (1,1 - 1) * 4,3627} = 0,1538 [-]$$

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{sp,min}^v + (\alpha_s - 1) * O_{vz,min}^v} = \frac{0,79 + 0,0057}{49764 + (1,1 - 1) * 4,3627} = 0,1472 [-]$$

$$r_s = r_{RO_2} + r_{H_2O} = 0,1538 + 0,1472 = 0,3009 \quad (5.5.14.)$$

$$p_s = r_s * p = 0,3009 * 0,1 = 0,03 \text{ MPa} \quad (5.5.15.)$$

$p = 0,1 \text{ MPa}$  tlak spalín se běžně bere

- Teplota nánosů na vnějším povrchu trubek

$$T_z = t_{m, střed} + \Delta t + 273,15 = 100 + 80 + 273,15 = 453,15 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.5.16.)$$

$\Delta t = 80^\circ\text{C}$  pro vstup spalín do ohřívák vody o teplotě  $>400^\circ\text{C}$

$$t_{m, střed} = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{70 + 130}{2} = 100^\circ\text{C} \quad (5.5.17.)$$

- Součinitel přestupu a sálání

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_k = 16,7807 + 116,0856 = 132,8663 \frac{W}{m^2 K} \quad (5.5.18.)$$

- Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_1 = t_{sp,out} - t_{np,in} = 830 - 70 = 760^\circ C \quad (5.5.19.)$$

$$\Delta t_2 = t_{sp,in} - t_{np,out} = 840 - 130 = 710^\circ C \quad (5.5.20.)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} \Delta t = \frac{760 - 710}{\ln\left(\frac{760}{710}\right)} = 734,7165^\circ C \quad (5.5.21.)$$

- Součinitel zanesení

$$\varepsilon = C_d * C_f * \varepsilon_0 + \Delta \varepsilon \quad (5.5.22.)$$

$$\varepsilon = 0,75 * 0,002 + 0,0015 = 0,003 \text{ m}^2 K/W$$

$\varepsilon_0 = 0,002 \text{ m}^2 K/W$  byl zvolen dle diagramu ve zdroji [3]

$\Delta \varepsilon = 0,0015 \text{ m}^2 K/W$  pro ohřívák vody  $t > 400^\circ C$

$C_d = 0,75$  opravný koeficient na průměr trubek

- Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\alpha}{1 + \varepsilon * \alpha} = \frac{132,8663}{1 + 0,003 * 132,8663} = 94,9995 \frac{W}{m^2 K} \quad (5.5.23.)$$

- Výkon membránového ohříváku v II.tahu

$$Q_{mem.II.tah} = M_{vody \text{ mem.II.tah}} * \Delta i = 3,6806 * 251,76 = 926,628 \text{ W} \quad (5.5.24.)$$

$$i_{vstup(130^\circ C)} = 545,48 \text{ kJ/kg}$$

$$i_{vystup(70^\circ C)} = 293,72 \text{ kJ/kg}$$

$M_{vody \text{ mem.II.tah}} = 3,6806 \text{ dm}^3/s$  do membránové stěny je pomocí regulačních ventilů pouštěna jen část z celkového množství vody  $M_{vody} = 59,5806 \text{ dm}^3/s$ .

- Výhřevná plocha ohříváku vody

$$S_{mem.II.tah} = \frac{Q_{mem.II.tah}}{k * \Delta t} = \frac{926,628}{94,9995 * 734,7165} = 13,2765 \text{ m}^2 \quad (5.5.24.)$$

- Počet trubek pro vstup vody

viskozita vody pro střední teplotu 100°C  $\vartheta_{np} = 0,0011043 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$n_{tr} = \frac{4 * M_{vody OV I} * \vartheta_{np}}{\pi * (D - 2t_r)^2 * w_{np}} \quad (5.5.25.)$$

$$n_{tr} = \frac{4 * 3,2973 * 0,0011043}{\pi * (0,038 - 2 * 0,004)^2 * 0,5}$$

$$n_{tr} = 10,3 \text{ kusů} \Rightarrow 10 \text{ kusů zvýšení rychlosti je zanedbatelné}$$

- Délka jedné trubky

jelikož se jedná o membránovou stěnu, teplo je předáváno jen na poloviční plochu pláště trubky, proto je počet trubek podělen dvěma

$$S_{pl} = \frac{n_{tr}}{2} * \pi * D * L \Rightarrow L = \frac{S_{mem.II.tah}}{\frac{n_{tr}}{2} * \pi * D} \quad (5.5.26.)$$

$$L = \frac{11,89}{\frac{10}{2} * \pi * 0,038} = 22,24 \text{ m}$$

## 6 Celkový výkon kotle

Celkový výkon kotle je součtem tepelných výkonů jednotlivých tepelných ploch pro ohřev vody.

$$Q_{celkem} = Q_{mem.II.tah} + Q_{mem.st.SK} + Q_{OV I} + Q_{OV II} \quad (6.1.)$$

$$Q_{celkem} = 926,628 + 7780,5956 + 3147 + 3147$$

$$Q_{celkem} = 15\,001,2 \text{ kW}$$

## 7 Konstruktivní návrh kotle

Výkresy ohříváků vody, ohříváků vzduchu a konstrukčního návrhu kotle jsou přiloženy k diplomové práci.

## 8 Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout horkovodní fluidní kotel na spalování hnědého uhlí. Jako palivo bylo zvoleno hnědé uhlí z dolů Bílina. Parametry vody jsou pro vstup 70°C, výstup 130°C při tlaku 1,4 MPa. Výška spalovací komory je 22 m, šířka 2m, hloubka 2,5m, stěny spalovací komory jsou tvořeny membránovými stěnami s trubky TR 38x4 a praporky o tloušťce 4mm, rozteč mezi trubkami je 17,3 mm. Za spalovací komorou se nachází cyklón o objemu 128,36m<sup>3</sup>, jenž slouží k odloučení inertních částic ve spalinách. Odloučené částice z cyklónu se vracejí zpět do fluidní vrstvy přes fluidní uzávěr. Za cyklónem se nachází II. tah. Začátek II. tahu je tvořen membránovými stěnami. Za membránovými stěnami se nachází ohřívák vody I, který ohřívá vodu na 100°C, ohřátá voda poté proudí do ohříváku vody II. Ohříváky vody I. a II jsou tvořeny hladkými trubkami TR38x3,2. Jako poslední teplosměnná plocha nacházející se v II.tahu je ohřívák vzduchu. Ten je tvořen z 1224 trubek TR 34x3, spaliny procházejí skrz trubky, které ohřívají vzduch proudící uvnitř ohříváku. Celkový výkon navrženého horkovodního fluidního kotle je 15MW<sub>t</sub>.

Tab.8.1 Konstrukční parametry kotle

Název teplosměnné plochy	Průměr trubek [mm]	Tloušťka trubky [mm]	Počet trubek	Uložení	Výkon [kW]
Ohřívák vody I	38	3,2	70	Hladké trubky za sebou	3147
Ohřívák vody II	38	3,2	70	Hladké trubky za sebou	3147
Membránové stěny spalovací komory	38	4	152	Svařené opraporkované trubky	7780
Membranové stěny II tah nad ohřívákem vody I	38	4	10	Svařené opraporkované trubky	926

## Citace

- [1] ROUBÍČEK, Václav. *Uhlí: zdroje, procesy, užití*. 2002. Ostrava: Montanex, 2002. Odborné publikace. ISBN 8072250639.
- [2] ČECH, Bohumír. *Fluidní spalovací zařízení v energetice: Fluidized bed combustion devices in energetics : teze habilitační přednášky*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2011. ISBN 9788024824901
- [3] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 9788001037577.
- [4] Vladislav Polach Plzeň, ppt stáhnout. *SlidePlayer - Nahrávejte a Sdílejte své PowerPoint prezentace* [online]. Copyright © 2017 SlidePlayer.cz Inc. [cit. 10.05.2017]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/6816422/>
- [5] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 9788073610517.
- [6] ODBORNÉ VZDĚLÁVÁNÍ ÚŘEDNÍKŮ PRO VÝKON STÁTNÍ SPRÁVY OCHRANY OVZDUŠÍ V ČESKÉ REPUBLICE. Spalování paliv - Kotle Ing. Jan Andreovský Ph.D. - PDF. *Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací*. [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 11.05.2017]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/15015097-Odborne-vzdelavani-uredniku-pro-vykon-statni-spravy-ochrany-ovzdusi-v-ceske-republice-spalovani-paliv-kotle-ing-jan-andreovsky-ph-d.html>

## Seznam použitých zkratk

Značka	Jednotka	Význam
a	[m]	šířka spalovací komory
a <sub>0</sub>	[-]	stupeň černosti
$\alpha$	[-]	přebytek vzduchu
$\alpha_k$	[W/m <sup>2</sup> K]	součinitel přestupu tepla konvekcí
$\alpha_s$	[W/m <sup>2</sup> K]	součinitel přestupu tepla sáláním
$\alpha_l$	[W/m <sup>2</sup> K]	součinitel přestupu tepla ze spalín do stěny
b	[m]	hloubka spalovací komory
$\beta$	[-]	součinitel přebytku vzduchu
c	[m]	výška spalovací komory
C <sub>SP</sub>	[kJ/m <sup>3</sup> K]	měrné teplo spalín
c <sub>d</sub>	[-]	opravný koeficient na vnitřní průměr trubky
c <sub>s</sub>	[-]	opravný součinitel na uspořádání svazku
c <sub>z</sub>	[-]	opravný součinitel na počet řad svazku
C <sub>r</sub> /H <sub>r</sub>	[-]	podíl obsahu uhlíku a vodíku v původním vzorku
d	[m]	vnitřní průměr trubky
d <sub>e</sub>	[m]	ekvivalentní průměr
D	[m]	vnější průměr trubky
$\varepsilon$	[-]	součinitel znečištění výhřevné plochy
F <sub>sp</sub>	[m <sup>2</sup> ]	světlý průřez spalín
$\varphi$	[%]	relativní vlhkost vzduchu
i	[kJ/m <sup>3</sup> ]	entalpie složek spalín
i <sub>IN</sub>	[kJ/m <sup>3</sup> ]	entalpie vstupujících spalín
i <sub>OUT</sub>	[kJ/m <sup>3</sup> ]	entalpie vystupujících spalín
$\Delta i$	[kJ/m <sup>3</sup> ]	rozdíl entalpii
k	[W/m <sup>2</sup> K]	součinitel prostupu tepla
k <sub>s</sub>	[m <sup>-1</sup> ·MPa <sup>-1</sup> ]	součinitel zeslabení sálání
k <sub>sp</sub>	[m <sup>-1</sup> ·MPa <sup>-1</sup> ]	součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny:
M <sub>vody</sub>	[m <sup>3</sup> /s]	průtočné množství vody
M <sub>P</sub>	[m <sup>3</sup> /s]	množství paliva přivedeného do kotle
n	[-]	počet trubek
$\eta_k$	[%]	tepelná účinnost kotle
O	[m]	obvod světlého průřezu kanálu
O <sub>O2min</sub>	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	minimální množství kyslíku při spalování plynu
O <sub>VZ</sub>	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	množství vzduchu
O <sub>CO2</sub>	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	objem CO <sub>2</sub> ve spalínách
O <sub>SO2</sub>	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	objem SO <sub>2</sub> ve spalínách
O <sub>N2</sub>	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	objem N <sub>2</sub> ve spalínách
O <sub>H2Omin</sub>	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	objem H <sub>2</sub> O <sub>min</sub> ve spalínách
O <sub>SPmin</sub>	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	množství vlhkých spalín
O <sub>VZ</sub>	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	skutečné množství vzduchu
O <sub>SP</sub>	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	skutečné množství spalín
O <sub>H2O</sub>	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	objem H <sub>2</sub> O ve spalínách
p	[MPa]	tlak
Q	[MW]	tepelný výkon jednotlivých ploch
Q <sub>i</sub>	[MJ/m <sup>3</sup> ]	výhřevnost paliva
q <sub>s</sub>	[kW/m <sup>2</sup> ]	střední tepelné zatížení stěn ohniště
s <sub>1</sub>	[m]	příčná rozteč
s <sub>2</sub>	[m]	podélná rozteč

$t$	[°C]	teplota
$T$	[K]	teplota
$t_{tr}$	[m]	tloušťka trubky
$t_{IN}$	[°C]	vstupní teplota
$t_{OUT}$	[°C]	výstupní teplota
$W_{sp}$	[m/s]	rychlost spalin
$z_1$	[-]	počet trubek v jedné řadě
$z_2$	[-]	počet řad
$\pi$	[-]	Ludolfovo číslo
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	součinitel kinematické viskozity
$\Psi$	[-]	součinitel tepelné efektivnosti
$\lambda$	[W/m·K]	součinitel tepelné vodivosti
$\sigma_1$	[-]	poměrná příčná rozteč
$\sigma_2$	[-]	poměrná podélná rozteč



## Seznam obrázků, tabulek a příloh

### Seznam obrázků

Obr. 2.1. Fluidní kotel se stacionární fluidní vrstvou.....	12
Obr.2.2. Fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou.....	13
Obr. 3.1 I-t diagram spalín.....	18
Obr.4.3.1 Návrh spalovací komory.....	20
Obr.4.4.1. Rozměry vnitřní části cyklónu.....	21
Obr.4.4.2 Cyklónový odlučovač pro 15 MW horkovodní kotel.....	23
Obr.5.1.1 Teplotní spád spaliny-vzduch.....	24
Obr.5.1.2 Ohřívač vzduchu.....	28
Obr.5.2.1 Teplotní spád OV I. spaliny-voda.....	29
Obr.5.2.2. Model ohřívače vody I.....	34
Obr.5.3.1 Teplotní spád OV II spaliny-voda.....	34
Obr. 5.3.2 Model ohřívače vody II.....	39
Obr.5.5.1 Teplotní spád spaliny-voda.....	40

### Seznam tabulek

Tab. 3.1 Prvkový rozbor paliva.....	13
Tab. 3.2 Měrná entalpie vybraných složek .....	16
Tab. 3.3 I-t tabulka spali.....	18
Tab.8.1 Konstrukční parametry kotle.....	45

### Seznam příloh

Výkresová dokumentace

CD-ROM s elektronickou dokumentací